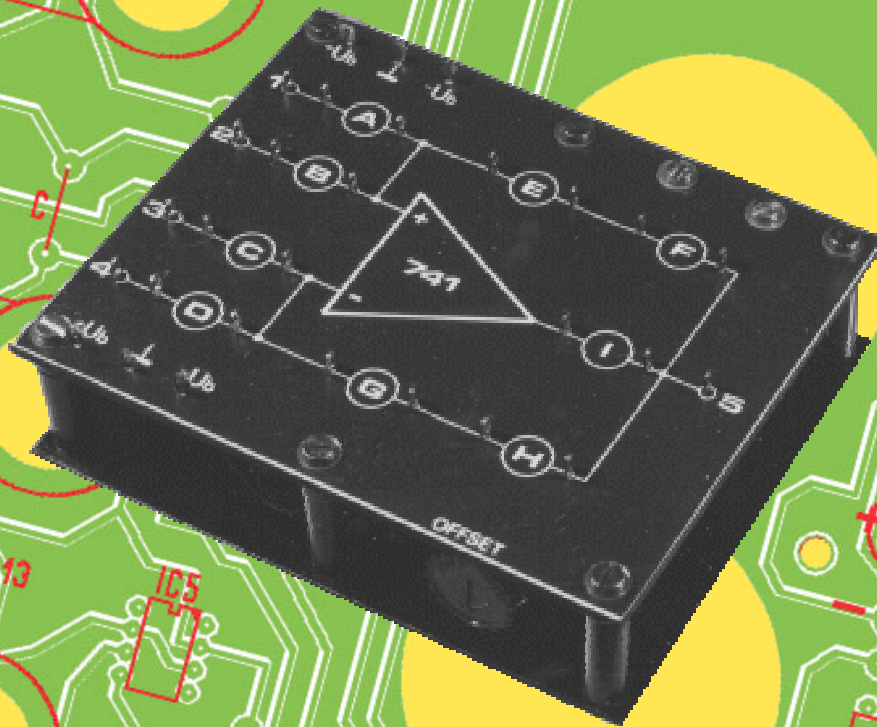


# Het op-amp experimenteer boek



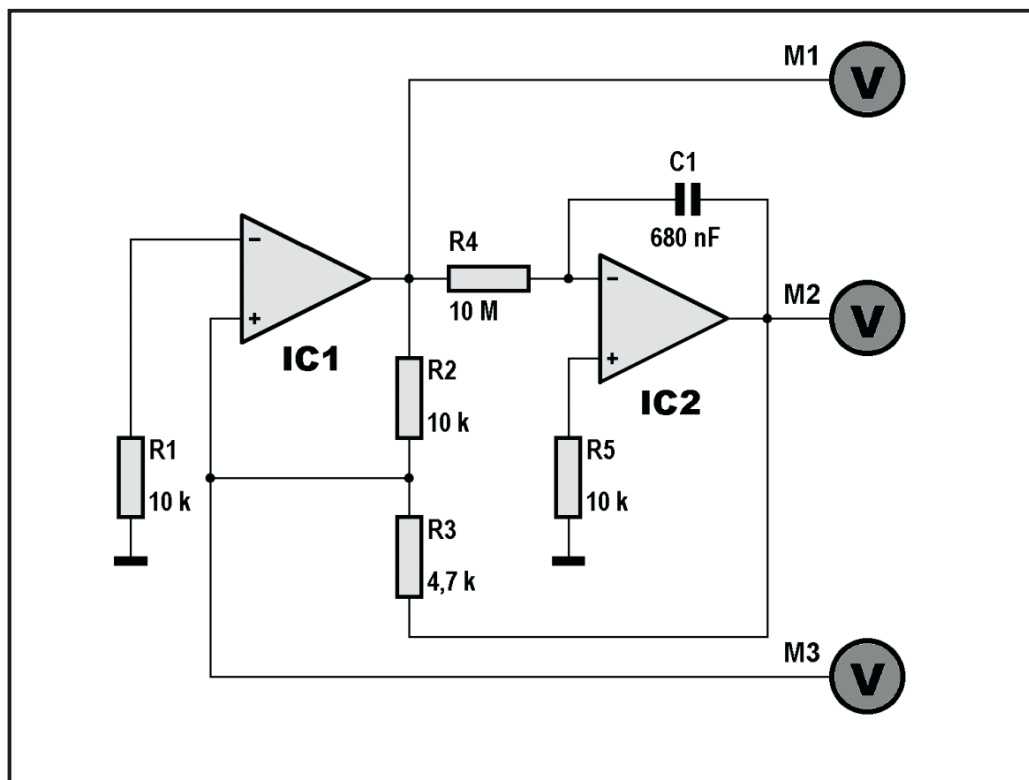
Dertig experimenten met de  
741 op-amp

Vego

Jos Verstraten

# Het op-amp experimenteer boek

Jos Verstraten



**Vego** VOF

Vego VOF, Postbus 32.014 JA Landgraaf (NL), vego\_vof@compuserve.com, www.vego.nl

**Auteur** Jos Verstraten, Landgraaf (NL)

**Uitgever** Vego VOF  
Postbus 32.014, 6370 JA Landgraaf (NL)  
E-mail vego\_vof@compuserve.com  
Telefoon 045-533.22.00  
Fax 045-533.22.02  
Internet [www.vego.nl](http://www.vego.nl)  
[www.elektronicaboeken.nl](http://www.elektronicaboeken.nl)

**ISBN-10** 90-8529-000-7  
**ISBN-13** 978-90-8529-000-1

**NUR** 468

**SISO** 663.43

**Eerste druk** februari 2006

## **DISCLAIMER**

Auteur en uitgever zijn zich volledig bewust van hun taak een zo betrouwbaar mogelijke uitgave te verzorgen. Voor eventueel in deze uitgave voorkomende onjuistheden kunnen zij echter geen aansprakelijkheid aanvaarden.

© 2006, Vego VOF, Landgraaf

Behoudens de in/of krachtens de auteurswet 1912 vastgestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, software of op welke andere manier dan ook, zonder voorafgaandelijke schriftelijke toestemming van Vego VOF, gevestigd te Landgraaf (NL), die daartoe met uitzondering van ieder ander door de auteursrechthebbende(n) is gemachtigd.

# Inhoud

	Inhoud . . . . .	3
	Voorwoord . . . . .	5
1	De universele op-amp trainer . . . . .	7
2	Kennismaking met de 741 op-amp . . . . .	33
3	De op-amp als buffer versterker . . . . .	39
4	De op-amp als omkeerversterker . . . . .	43
5	De op-amp als niet-inverterende versterker . . . . .	47
6	De op-amp als inverterende versterker . . . . .	51
7	De op-amp als mengversterker . . . . .	55
8	De op-amp als rekenschakeling . . . . .	59
9	De op-amp als differentiator . . . . .	63
10	De op-amp als integrator . . . . .	65
11	De op-amp als trapspanninggenerator . . . . .	69
12	De op-amp als comparator . . . . .	73
13	De op-amp als comparator met hysteresis . . . . .	77
14	De op-amp als functiegenerator . . . . .	81
15	De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling . . . . .	85
16	De op-amp als vensterdiscriminator . . . . .	91
17	De op-amp als slope detector . . . . .	95
18	De op-amp als ideale diode . . . . .	99
19	De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter . . . . .	103
20	De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter . . . . .	107
21	De op-amp als topdetector . . . . .	111
22	De op-amp als ideale topdetector . . . . .	115
23	De op-amp als clampschakeling . . . . .	119
24	De op-amp als sinusgenerator . . . . .	123
25	De op-amp als anti-ripple filter . . . . .	127
26	De op-amp als vierkantgolf generator . . . . .	131
27	De op-amp als flip-flop . . . . .	135
28	De op-amp als vertrager . . . . .	139
29	De op-amp als monostabiele multivibrator . . . . .	141
30	De op-amp als poort . . . . .	145
31	De op-amp als tiptoets . . . . .	149
32	Geen einde, maar hopelijk een begin! . . . . .	151
33	De ontwerpen van de print- en frontplaten . . . . .	155





# Voorwoord

## **De op-amp, hét basisonderdeel van de analoge elektronica**

De 741 is ongetwijfeld een van de meest universele en populaire operationele versterkers (op-amp's) die ooit op de markt zijn gezet. Over dit kleine, achtpotige onderdeelje gaat dit boek. Aan de hand van eenvoudige experimenten gaan wij u leren hoe u met deze chip allerlei soorten schakelingen kunt ontwerpen. Schakelingen, die de basis vormen van de analoge elektronica, dát deel van de elektronica waar u werkt met spanningen die alle mogelijke waarden kunnen hebben. Ondanks de digitale revolutie speelt deze analoge elektronica nog steeds een belangrijke rol. U kunt geen elektronisch apparaat bedenken of er zit wel analoge elektronica in. En de kans is groot dat de ontwerpers van die elektronica minstens een paar op-amp's in dit ontwerp hebben toegepast.

## **Leer schakelingen ontwerpen met de op-amp**

“Het op-amp experimenteer boek” is een écht doe-boek voor de actieve (beginnende) elektronicus! In dertig experimenten leert u de op-amp 741 toe te passen in even zoveel basisschakelingen, van de eenvoudige bufferversterker tot de ideale gelijkrichter, van de comparator met hysteresis tot de sinusgenerator, van de integrator tot de monostabiele multivibrator. Na het uitvoeren van deze dertig experimenten heeft u zoveel ervaring met op-amp's, dat het ontwerpen van eigen analoge schakelingen geen enkel probleem meer is.

## **Bouw de universele op-amp trainer**

In het eerste hoofdstuk van dit boek bouwt u, aan de hand van de uitgebreide bouwbeschrijving, de universele op-amp trainer. Een professioneel meetapparaat, dat u deingangsspanningen en -signalen levert voor uw experimenten. Met de drie ingebouwde spanningsmeters kunt u uw schakelingen uittesten.

## **Maak experimenteerprintjes voor op-amp's**

U bouwt vervolgens kleine experimenteerprintjes, die u aansluit op uw universele op-amp trainer en waarop u de dertig experimenten soldeert.

## **Dertig praktische toepassingen van op-amp's**

“Het op-amp experimenteer boek” behandelt de volgende praktische schakelingen met een of twee 741 op-amp's:

- De op-amp als buffer versterker;
- De op-amp als omkeerversterker;
- De op-amp als niet-inverterende versterker;
- De op-amp als inverterende versterker;
- De op-amp als mengversterker;
- De op-amp als rekenschakeling;
- De op-amp als differentiator;
- De op-amp als integrator;
- De op-amp als trapspanningsgenerator;
- De op-amp als comparator;
- De op-amp als comparator met hysteresis;

- De op-amp als functiegenerator;
- De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling;
- De op-amp als vensterdiscriminator;
- De op-amp als slope detector;
- De op-amp als ideale diode;
- De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter;
- De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter;
- De op-amp als topdetector;
- De op-amp als ideale topdetector;
- De op-amp als clampschakeling;
- De op-amp als sinusgenerator;
- De op-amp als anti-ripple filter;
- De op-amp als vierkantgolf generator;
- De op-amp als flip-flop;
- De op-amp als vertrager;
- De op-amp als monostabiele multivibrator;
- De op-amp als poort;
- De op-amp als tiptoets;
- De op-amp met enkelvoudige voeding.

In deze dertig experimenten wordt dus een groot aantal praktische toepassingen van operationele versterkers belicht, die zelfs voor een ervaren ontwerper niet allemaal voor de hand liggen.

Ik hoop dat u aan de experimenten die in dit boek zijn beschreven net zoveel plezier gaat beleven als ondergetekende bij het bedenken ervan!

*Jos Verstraten*  
*Landgraaf, februari 2006*

# 1 De universele op-amp trainer

## Inleiding

### Eerst een apparaat, dán pas experimenteren

Dit eerste hoofdstuk is meteen het moeilijkste hoofdstuk van dit boek. In dit hoofdstuk maakt u namelijk kennis met de “universele op-amp trainer”. Dit apparaat heeft u nodig om de in dit boek beschreven experimenten met op-amp's uit te kunnen voeren.

Deze “universele op-amp trainer” is niet te koop, u moet het apparaat zélf bouwen. Als u al wat ervaring heeft met het in elkaar solderen van eenvoudige elektronische schakelingen, moet u dit wel lukken. Wij hebben onze uiterste best gedaan de nabouw zo eenvoudig mogelijk te maken. In de trainer worden alleen algemeen gebruikelijke onderdelen toegepast, die u in iedere elektronica onderdelenhandel kunt kopen. Deze onderdelen zitten op een grote print, zodat u geen bedrading moet aanleggen.

Ook die print en de kleine hulpprinten zijn niet te koop, die moet u zélf maken. Natuurlijk stellen wij het ontwerp van deze printen via internet ter beschikking, zodat u alleen foto-gevoelige printplaat moet kopen. Nadien drukt u onze ontwerpen met uw inkjet printer af op transparante folie af en belicht, etst en boort op de gebruikelijke manier de printen. In hoofdstuk 33 van dit boek geven wij u de noodzakelijke richtlijnen.

### Een professioneel apparaat

Onze “universele op-amp trainer” kán, als u wat moeite aan de nabouw besteedt, uitgroeien tot een professioneel en universeel bruikbaar testapparaat. En als u de nodige zorg aan het uiterlijk besteedt, dan wordt zo'n trainer een pronkstuk in uw hobbyruimte of uw schoollokaal, waarmee u niet alleen alle toepassingen van operationele versterkers kunt uitpluizen, maar die net zo goed gebruikt kan worden voor een eerste kennismaking met

misschien volledig onbekende schakelingen, zoals Norton-versterkers, OTA's, geïntegreerde logaritmische versterkers en multipliers.

### Het concept van de op-amp trainer

Operationele versterkers werken, per definitie, met analoge spanningen. Het volstaat dus niet een aantal wel-signaal/geen-signaal schakelaartjes op te nemen en een aantal LED's voor het uitlezen van de digitale spanningen, zoals bij digitale trainers.

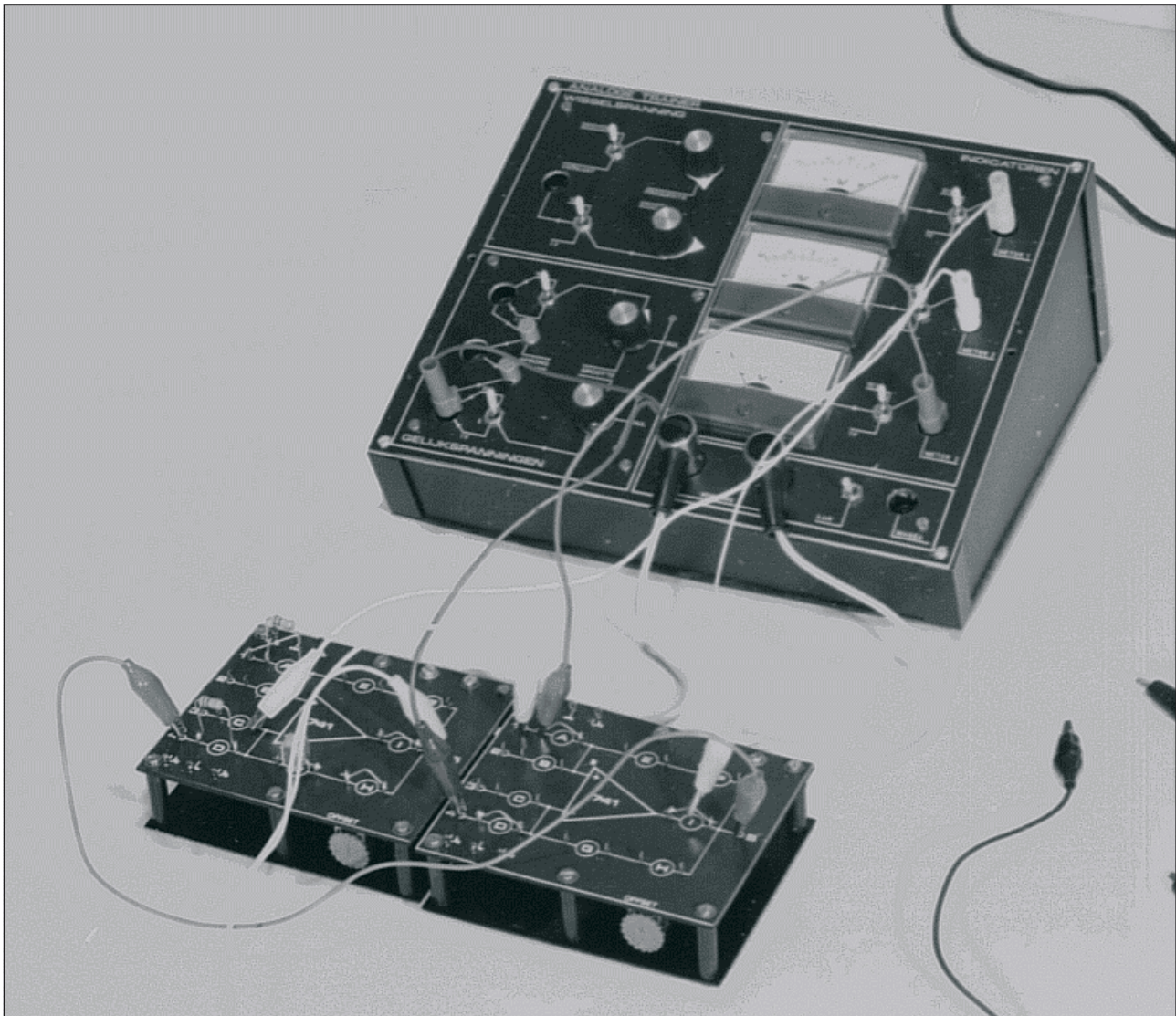
In principe moet u voor het uittesten van op-amp's een breed gamma aan signalen ter beschikking hebben: sinussen, driehoeken, blokken en dat over een groot frequentiebereik. Wilt u kunnen zien wat de op-amp's met die signalen doen, dan heeft u voltmeters, millivoltmeters en een oscilloscoop nodig. Kortom, u moet een compleet laboratorium opbouwen.

Toch kan het veel eenvoudiger en goedkoper. Als u zich voornamelijk in de basiswerking van geïntegreerde analoge schakelingen wilt verdiepen, dan kunt u net zo goed op een andere manier werken.

Met potentiometers wekt u gelijkspanningen op, regelbaar in het nuttige werkingsgebied van de schakeling. Door aan die potentiometers te draaien kunt u zeer laagfrequente sinussen, blokken en driehoeken simuleren. Een scoop is dan overbodig om te kijken hoe de signalen door de te testen schakeling beïnvloed worden. U kunt net zo goed simpele analoge meterschakelingetjes ontwerpen en op die draaispoel meetinstrumentjes leest u de werking van de schakeling af. Heeft u niet zo'n zin om voortdurend aan potentiometers te draaien, dan kunt u een eenvoudige functiegenerator inbouwen, die dat werkje als het ware voor u opknapt. Hij wekt zeer trage driehoeken en blokken op.

Hiermee is het silhouet van de op-amp trainer aan de horizon verschenen. Natuurlijk





**Figuur 1:** De universele op-amp trainer in gebruik met een proefschakeling met twee operationele versterkers.

moet u op de een of andere manier de proefschakelingen rond de operationele versterker kunnen opbouwen. Dat kan op een proefprintje, maar veel professioneler en overzichtelijker gaat dat als u daarvoor ook een speciaal printje ontwerpt, volledig aangepast aan het onderdeel dat u onder handen neemt: de op-amp.

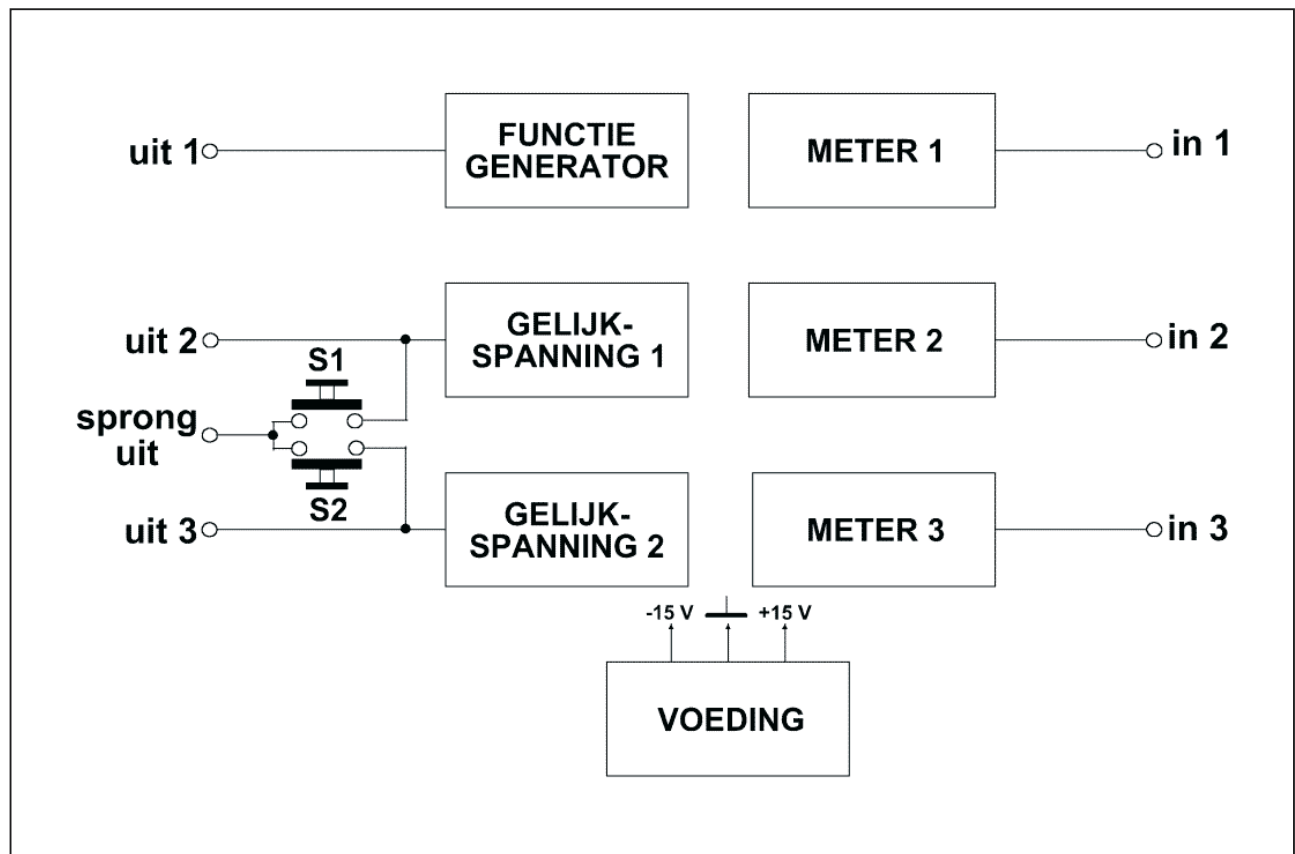
Het resultaat van die overpeinzingen is voorgesteld in figuur 1, waar de op-amp trainer gebruikt wordt met twee speciaal voor de 741 op-amp ontworpen proefprintjes.

### **Wat is de bedoeling?**

Het nabouwen van deze universele analoge trainer is een vrij dure grap en we kunnen ons voorstellen dat u eerst wel wilt weten wat wij

er mee van plan zijn. Wel, allereerst gaan we in dit hoofdstuk de bouw van het apparaat uitvoerig toelichten, zodat ook hobbyisten met niet veel ervaring in het nabouwen van grote projecten er raad mee weten. Nadien volgen een dertigtal kleine hoofdstukken, waarin telkens één basisschakeling rond de op-amp onder handen wordt genomen. Hier volgt het lijstje:

- inleiding over de op-amp;
- de op-amp als buffer;
- de op-amp als omkeerversterker;
- de op-amp als niet-inverterende versterker;
- de op-amp als inverterende versterker;
- de op-amp als mengversterker;
- de op-amp als rekenschakeling;



**Figuur 2:** Het blokschema van de universele op-amp trainer.

- de op-amp als differentiator;
- de op-amp als integrator;
- de op-amp als trapspanningsgenerator;
- de op-amp als comparator;
- de op-amp als comparator met hysteresis;
- de op-amp als functiegenerator;
- de op-amp met niet-lineaire terugkoppeling;
- de op-amp als vensterdiscriminator;
- de op-amp als slope detector;
- de op-amp als ideale diode;
- de op-amp als dubbelfazige gelijkrichter;
- de op-amp als nauwkeurige gelijkrichter;
- de op-amp als topdetector;
- de op-amp als ideale topdetector;
- de op-amp als clampschakeling;
- de op-amp als sinusgenerator;
- de op-amp als anti-ripple filter;
- de op-amp als vierkantgolf generator;
- de op-amp als flip-flop;
- de op-amp als vertrager;
- de flip-flop als monostabiele multivibrator;
- de op-amp als poort;
- de op-amp als tiptoets;
- geen einde, maar hopelijk een begin.

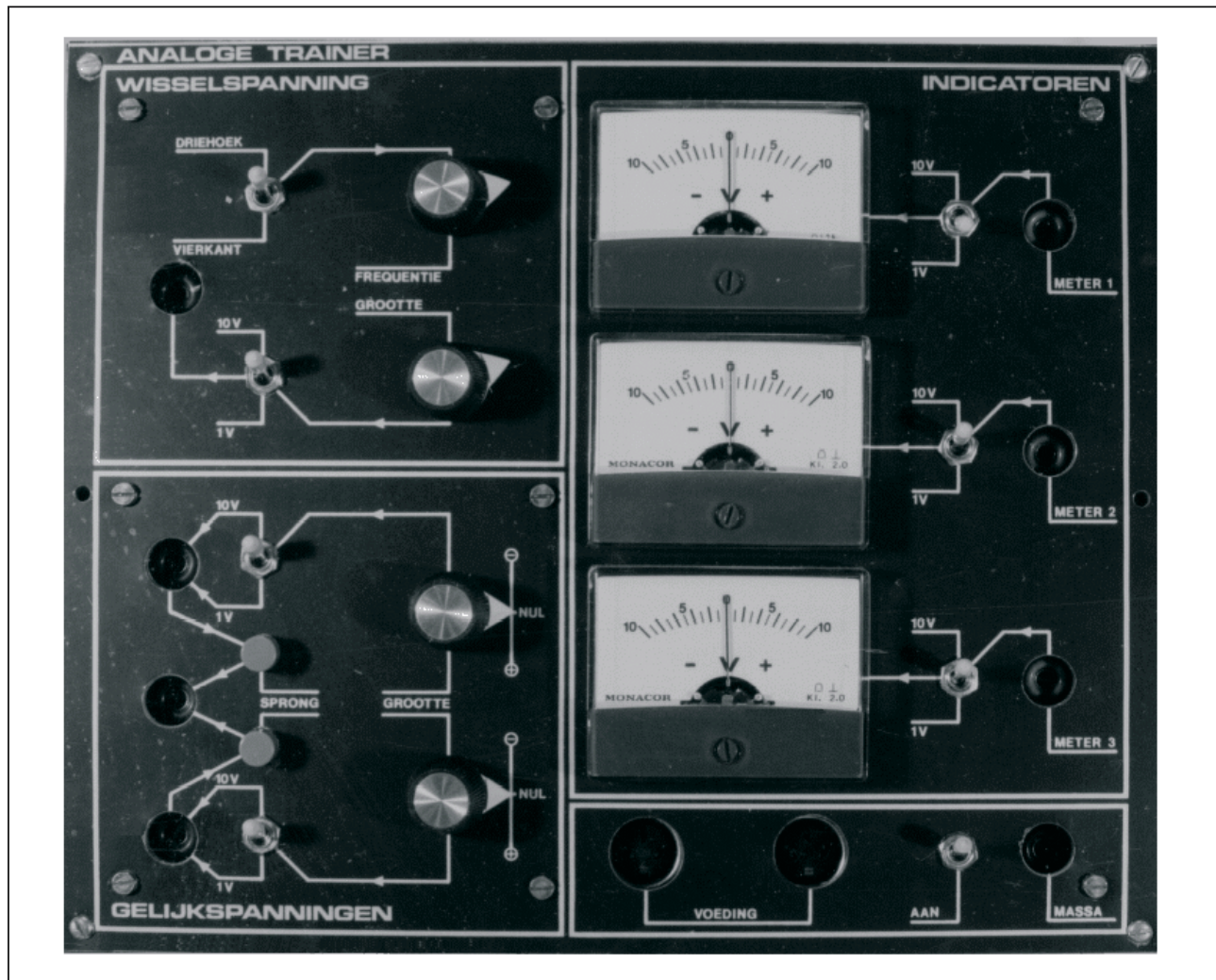
Al deze interessante experimenten kunt u met alleen de universele op-amp trainer uitvoeren, overige meetapparatuur is volstrekt overbodig. Verder houden we het steeds op een louter fysische werkingsverklaring, wiskundige abracadabra blijft achterwege.

### Kennismaking

#### met de universele op-amp trainer

Figuur 2 geeft het blokschema van deze universele op-amp trainer. De werking en functie van de verschillende blokken bespreken wij aan de hand van figuur 3, een overzicht van de bedieningsorganen van de trainer. Links boven ziet u het blok “Wisselspanning” dat het wisselspanning testsignaal opwekt met de functiegenerator. Nu moet u dat begrip “wisselspanning” niet al te ruim interpreteren. De schakeling wekt, naar uw keuze, een driehoek- of vierkantspanning op met een periodeduur van één seconde tot twee minuten! Wat daar het nut van is? Wel, bij analoge schakelingen komt het vaak voor dat u de zogenaamde transferkarakteristiek moet opnemen, dat is de relatie tussen uit-





**Figuur 3:** Het bedieningspaneel van de universele op-amp trainer.

en ingangsspanning. U laat dan de ingangsspanning langzaam stijgen en voor iedere waarde van die spanning leest u op een meter de grootte van de uitgangsspanning af. Dit kunt u met de hand doen door het verdraaien van een potentiometer. Door die lange periodeduur van de in de trainer ingebouwde functiegenerator kunt u dat proces echter automatiseren. U stuurt de traagste driehoek in de te testen schakeling en sluit een voltmeter aan op de uitgang van de generator. De spanning varieert dan zo langzaam van waarde, dat u steeds het verband tussen in- en uitgangsspanning op de meters kunt aflezen.

Hiermee is meteen de vraag beantwoord waarom we “ouderwetse” analoge naaldinstrumenten hebben ingebouwd. Op dergelijke meters kunt u heel goed het verloop van een spanning in functie van de tijd aflezen. U

ziet of de meternaald “stijgt” of “daalt”, de interpretatie van een stijgende of dalende spanning. Op de moderne digitale voltmeters is een dergelijk proces absoluut niet te volgen.

De twee onderste knoppen van het functiegenerator blok dienen voor het instellen van de uitgangsspanning. Met de omschakelaar kunt u twee bereiken instellen, namelijk 1 V en 10 V. In het eerste bereik varieert de driehoek maximaal tussen +1 V en -1 V. Door middel van de rechter potentiometer “Grootte” kunt u de uitgangsspanning continu regelen tussen 0 V en de maximale waarde.

Vaak heeft u bij het experimenteren met analoge schakelingen hulp- of instelspanningen nodig. Die haalt u uit het blok “Gelijkspanningen”. Met deze schakeling kunt u twee gelijkspanningen opwekken die u kunt instellen tussen -10 V en +10 V, in twee gebieden. Het

ene gaat van -1 V tot +1 V, het andere van -10 V tot +10 V.

Dit blok heeft nog een derde uitgang, waaruit u een spanningssprong kunt halen. Daartoe zijn twee drukknopjes opgenomen, die de uitgangen van de gelijkspanningsbronnen doorverbinden met de "Sprong"-uitgang. Als de drukknoppen in rust zijn, staat er op die uitgang 0 V. Bij het bedienen van een van de knoppen springt de uitgang opeens naar de waarde van een van beide gelijkspanningen. Dergelijke sprongspanningen zult u bij het experimenteren met het apparaat vaak nodig hebben.

Een op-amp heeft twee ingangen en een uitgang. Het is dus handig als u steeds drie verschillende spanningen tegelijkertijd kunt observeren. Dat kan met de drie kleine draaispoelmetertjes, ingebouwd in het blok "Indicatoren". Ze hebben de nul in het midden, zodat u zowel positieve als negatieve spanningen kunt meten, zonder het omdraaien van schakelaars of omprikken van draadjes. Door middel van schakelaars kunt u voor iedere meter een van beide meetgebieden inschakelen:  $\pm 1$  V of  $\pm 10$  V. De ingangsimpedantie van de meters is erg hoog, 20 M $\Omega$ , zodat ze nooit de werking van een schakeling kunnen verstoren. Anderzijds zijn de uitgangsimpedanties van de drie spanningsproducerende schakelingen erg laag, zodat ook zij geen invloed hebben op de eigenschappen van de te testen schakelingen.

Tot slot herkent u onder de meters een algemeen blok, met een massa-aansluiting, de aan/uit schakelaar en twee driepolige connectoren. Op deze twee laatste onderdelen staan de voedingsspanningen (+15 V, massa en -15 V) ter beschikking voor het voeden van de testschakelingen.

## De schakelingen

### De schakeling van de functiegenerator

De praktische schakeling van de functiegenerator is getekend in figuur 4. In principe kunt u driehoeken en blokken erg eenvoudig opwekken met operationele versterkers.

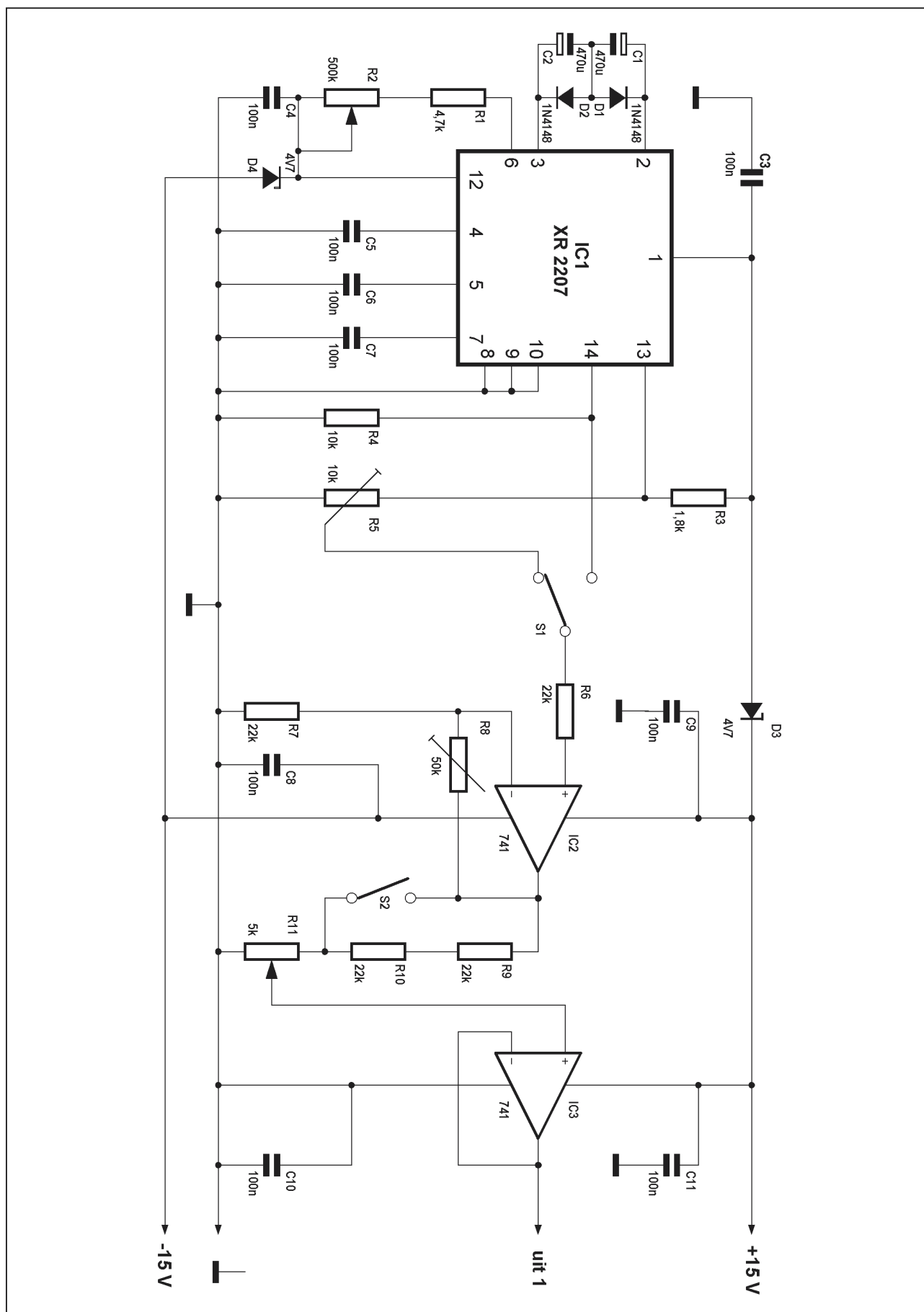
Daartegenover staat dat er speciale IC's in de handel zijn, die niets liever doen dan de gevraagde spanningen serveren. Vandaar dat we zo'n schakeling hebben toegepast, namelijk de XR2207. Een oud beestje, maar nog steeds goed verkrijgbaar en als het ware geschapen voor deze klus.

Dit IC heeft twee uitgangen. Op de ene (pen 13) staat een vierkantspanning ter beschikking, op de andere (pen 14) een driehoekspanning. Beide signalen hebben dezelfde frequentie. De driehoek kan zonder meer afgetakt worden. Wil de vierkant echter aan de uitgang verschijnen, dan moet u een extra weerstandje aangebrengen tussen de positieve voeding en de pen nummer 13.

Het IC heeft erg veel mogelijkheden, die we hier niet gebruiken. Vandaar dat een aantal ingangen ofwel rechtstreeks aan de massa liggen (pennen 8 en 9) ofwel via een ontkoppelcondensator (4, 5 en 7).

De frequentie wordt bepaald door de waarde van de condensator tussen de aansluitingen 2 en 3 en door de grootte van de weerstand tussen aansluiting 6 en de negatieve voeding. Voor het genereren van de noodzakelijke zeer lage frequentie heeft u een zeer grote condensatorwaarde nodig. U ontkomt dus niet aan het gebruik van een elco. Het probleem daarbij is echter dat de polariteit van de spanningen op pennen 2 en 3 wisselt. Een elco wordt dus gedurende een halve periode verkeerd gepolariseerd. Gelukkig bestaat er een eenvoudig truukje om met elco's toch een niet gepolariseerde condensator op te bouwen. Zet twee elco's van dezelfde waarde in serie, met plus aan plus of min aan min en overbrug beide onderdelen met een diode. Als pen 2 positief is ten opzichte van pen 3, dan gaat de diode D2 geleiden en wordt condensator C1 tussen de genoemde aansluitingen opgenomen. Als de polariteit van de spanningen wisselt, dan gaat D2 sperren en D1 geleiden. C1 wordt nu kortgesloten door de geleidende diode en is niet van tel. Zijn rol wordt nu dank zij de geleidende diode D1 overgenomen door C2.

De frequentiebepalende weerstand is opgebouwd uit de serieschakeling van R1 en R2 en heeft een regelbereik van 1 op 100. R1



**Figuur 4:** De schakeling van de functiegenerator.

legt de maximale frequentie vast, R2 de minimale.

De schakeling mag gevoed worden met spanningen van maximaal  $\pm 13$  V. Nu hebben we om diverse redenen gekozen voor een symmetrische voedingsspanning van 15 V. Vandaar de twee zenerdioden D3 en D4 in de voedingsaansluitingen van het IC. De voeding wordt gereduceerd tot de veilige waarde van  $\pm 10$  V. De condensatoren C3 en C4 zorgen voor een extra ontkoppeling van de voeding.

Door middel van schakelaar S1 kunt u ofwel de driehoek, ofwel de blok naar de rest van de schakeling leiden. Nu wil het geval dat het IC een driehoek levert met een amplitude gelijk aan ongeveer de helft van de amplitude van de blok. We willen beide signalen even groot, vandaar dat de blok door middel van een spanningsdeler (het instelpotentiometer-tje R5) aan de schakelaar wordt aangeboden.

De volgende trap rond IC2 is een simpel versterkertje, waarmee u de signalen oppept tot de gewenste 20 V top-tot-top. De versterking is regelbaar door middel van R8. Na deze versterking komt de instelling voor de grootte van de uitgangsspanning aan de beurt. Is schakelaar S2 gesloten, dan verschijnt de volle 20 V over de potentiometer R11. U kunt de grootte van de uitgangsspanning dan instellen tussen 0 V en 10 V. Wilt u een kleinere uitgang, dan opent u de schakelaar waardoor R9 en R10 gaan meespelen en het grootste gedeelte van de uitgangsspanning opslokken. Na de potentiometer R11 volgt een buffer, opgebouwd rond IC3. Deze zorgt voor een constante en lage uitgangsimpedantie, zonder de grootte van de spanning te beïnvloeden.

### De gelijkspanningen

Het schema waarmee de twee gelijkspanningen worden opgewekt, is getekend in figuur 5. De schakeling is de eenvoud zelve. Staat schakelaar S3 in de getekende stand, dan wordt er een spanningsdeler gevormd tussen de +15 V en de -15 V, opgebouwd uit de weerstanden R13, R14 en R16. De waarde van deze onderdelen is zo gekozen dat

over potentiometer R14 een spanning van 2 V valt, keurig verdeeld tussen -1 V en +1 V. Door het verdraaien van de looper kunt u dus iedere gewenste spanning tussen de genoemde grenzen aftakken en via een buffer IC4 aan de uitgang (uit-2) aanbieden. Wilt u een grotere spanning opwekken, dan schakelt u S3 om, de verhouding van de spanningsdelerweerstand wordt anders, zodat er over de potentiometer een totale spanning valt van 20 V, weer symmetrisch verdeeld tussen de plus en de min. Zoals overal in de trainer, zijn ook hier de voedingsaansluitingen van de op-amp keurig ontkoppeld door middel van 100 nF condensatoren.

Het tweede deel van de schakeling, rond operationele versterker IC5, is identiek van opbouw.

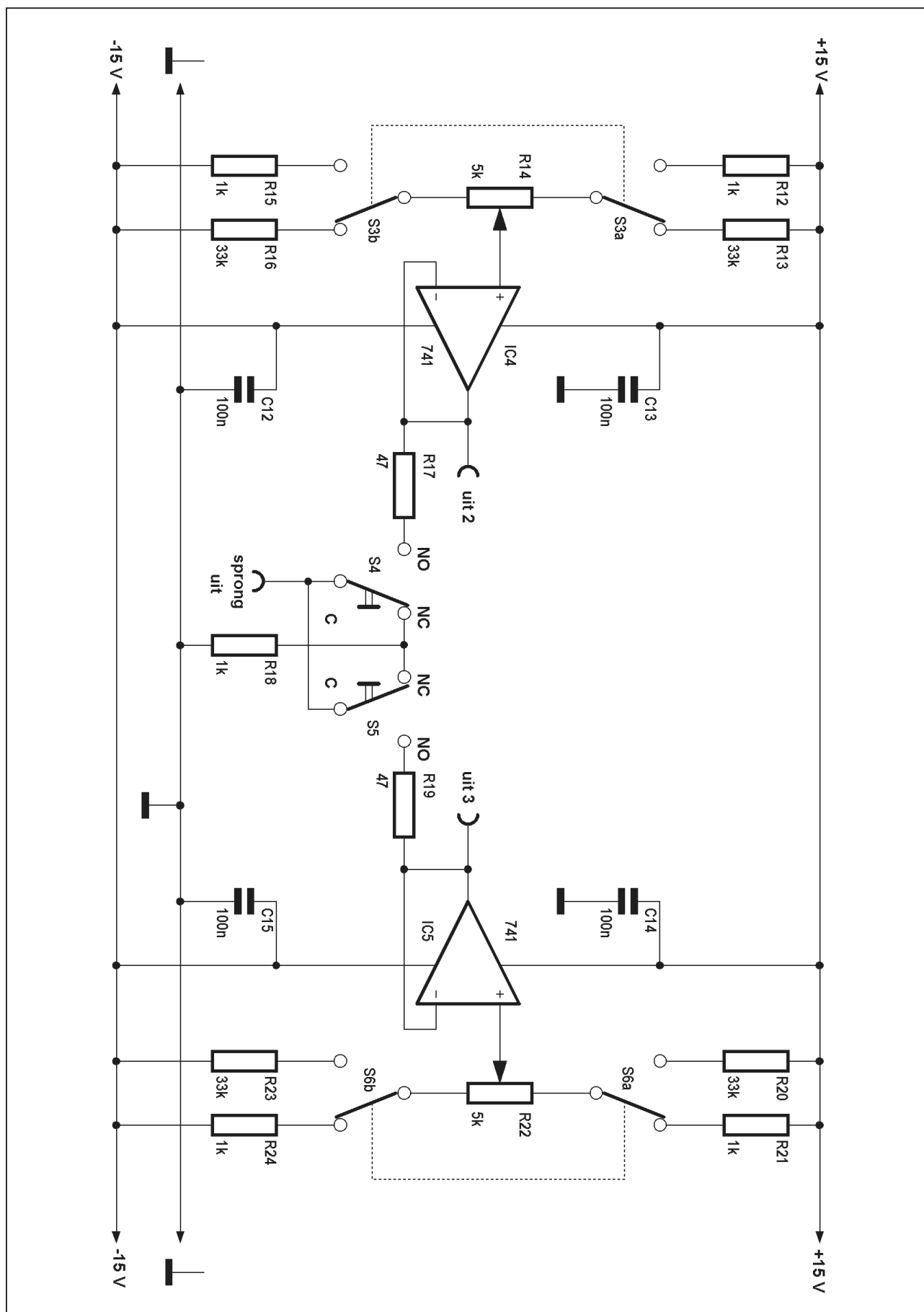
De twee drukschakelaars S4 en S5 worden ingeschakeld voor het opwekken van de spanningssprongen. Deze schakelaars hebben een omschakelcontact. Als u de schakelaars niet indrukt dan zullen de moedercontacten (c) via de normaal gesloten contacten (nc) worden doorverbonden met weerstand R18. De uitgang "Sprong uit" ligt aan de massa. Drukt u bijvoorbeeld op S4 dan wordt de spanning die u met S3 en R14 heeft ingesteld via de kleine weerstand R17 verbonden met de "Sprong uitgang".

### De indicatoren

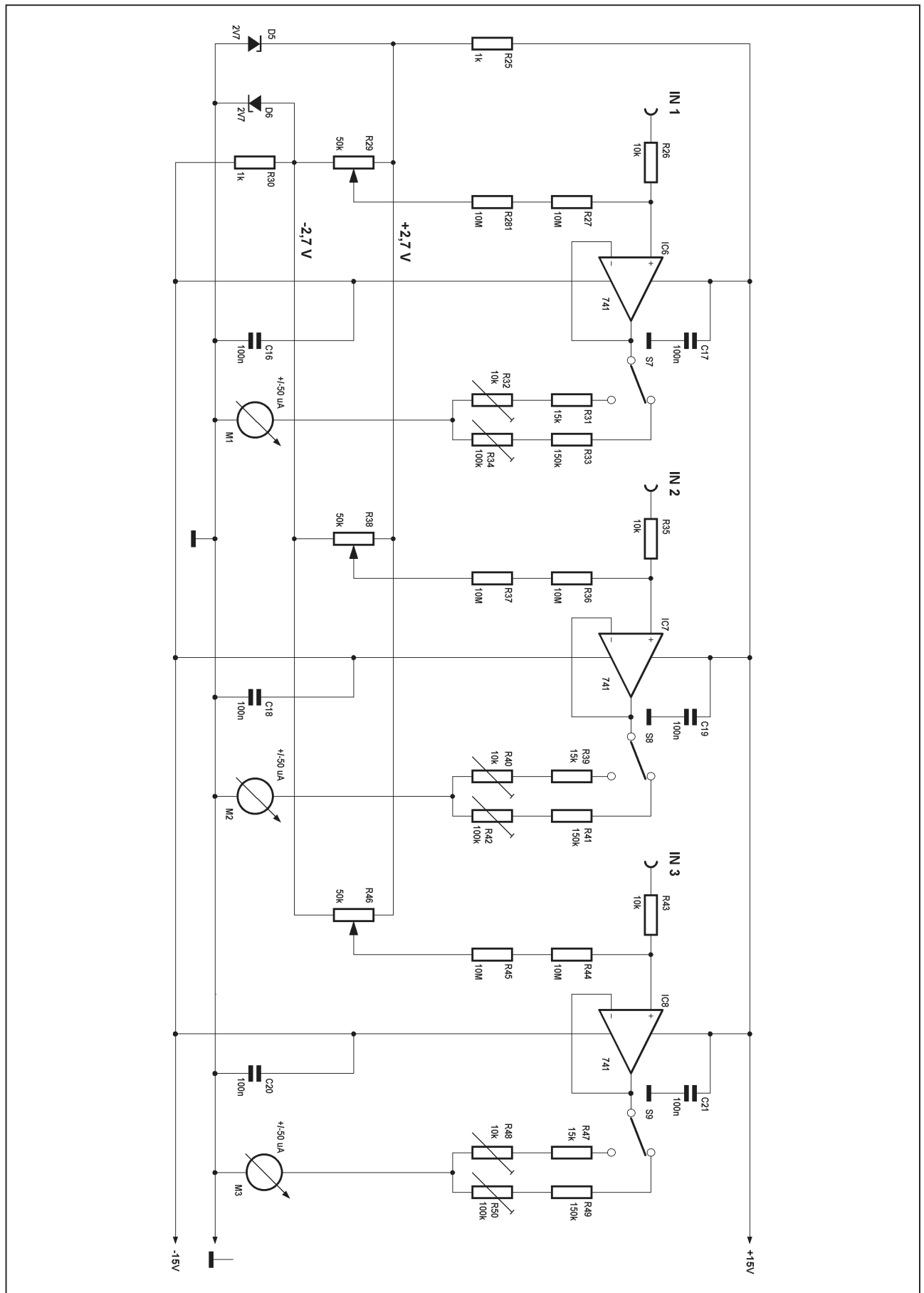
De schakeling voor het sturen van de drie meetinstrumentjes is getekend in figuur 6. We willen zowel positieve als negatieve spanningen meten, vandaar dat het gebruik van meetinstrumenten met de nul in het midden voor de hand ligt. Gekozen is voor -50  $\mu$ A - 0 - +50  $\mu$ A draaispoelmeetertjes, met als afmetingen 60 mm bij 46 mm. Deze hebben een inwendige weerstand van 1,2 k $\Omega$ .

In principe zouden we door middel van voor-schakelweerstand spanningen kunnen gaan meten. De totale weerstand is dan toch wel wat laag, vandaar dat gekozen is voor een elektronische meetschakeling. Het te meten ingangssignaal wordt door middel van een weerstand (R26) aangeboden aan een als buffer geschakelde operationele versterker (IC6). Deze schakeling wordt gekenmerkt





**Figuur 5:** Het schema van de gelijkspanningsgeneratoren.



**Figuur 6:** De schakeling van de drie spanningsmeters.

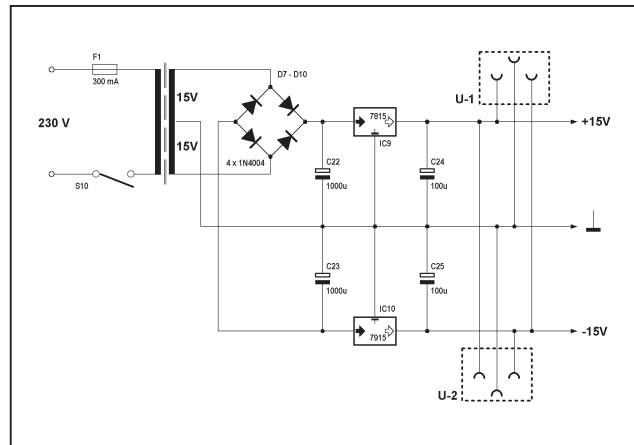
door een zo goed als oneindige ingangsweerstand en spanningsversterking van 1. De uitgang van de buffer stuurt een bereikenschakelaar S7. In de stand 1 V wordt de meter gestuurd uit de uitgang van de buffer via twee weerstandjes R31 en R32, deze laatste ijkt het meetbereik. In de stand 10 V worden twee tien keer zo grote weerstanden in serie met de meter opgenomen, waarbij de instelpotmeter R34 dient voor het ijkken van het bereik. In principe zouden we klaar zijn, ware het niet dat de offset van de operationele versterker roet in het eten strooit. De offset (in het tweede experiment komen we op dit begrip terug) zorgt ervoor dat er op de uitgang van de buffer toch een kleine spanning verschijnt, zelfs als de ingang aan de massa ligt. U moet deze offset compenseren en dat doet u door aan de positieve ingang van de op-amp een kleine instelspanning aan te leggen. Twee zenerdioden D5 en D6 worden gebruikt voor het genereren van een kleine positieve en even kleine negatieve spanning. Tussen beide spanningen staat een instelpotmeter R29. De loper van dit onderdeel gaat naar de positieve ingang van de op-amp, via twee zeer grote weerstanden R27 en R28. Bij het afregelen van de trainer kunt u deze instelpotentiometer gebruiken om, bij open ingang, de uitslag van de meter exact op nul af te regelen.

De ingangsweerstand van de meterschakeling wordt bepaald door de waarde van R27 en R28 en is dus  $20\text{ M}\Omega$ , meer dan voldoende om zonder beïnvloeding in wat voor soort schakeling dan ook te kunnen meten.

### De voeding

De voeding van de trainer is getekend in figuur 7 en verbergt geen wereldschokkende nieuwe uitvindingen. De twee 15 V wikkelingen van de trafo worden door middel van vier in brug geschakelde dioden gelijkgericht en leveren gelijkspanningen van ongeveer  $\pm 20\text{ V}$ . Deze spanningen worden aangeboden aan de ingangen van geïntegreerde stabilisatoren van het type 7815 en 7915. De gestabiliseerde uitgangsspanningen van  $\pm 15\text{ V}$  worden nog eens extra ontkoppeld en voeden de geïntegreerde schakelingen van de

trainer. Beide spanningen en de massa worden ook nog eens door middel van twee drie-polige connectoren naar buiten gevoerd voor het voeden van de testbordjes.



**Figuur 7:** De schakeling van de symmetrische voeding.

## De bouw van de trainer

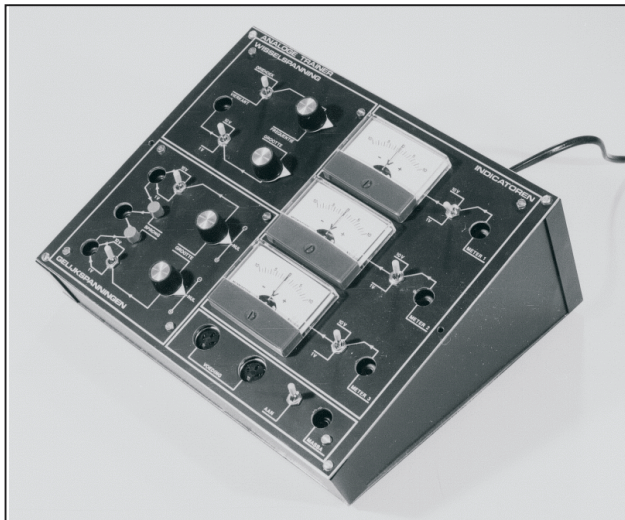
### Inleiding

De uitvoering van het prototype van de universele op-amp trainer, waarvan figuur 8 een indruk geeft, hoeft zeker niet onder te doen voor gelijk welk professioneel apparaat. Natuurlijk vergt het heel wat uren en zeer nauwkeurig werken alvorens dit resultaat op uw werkbank staat. Maar aan de hand van deze uitgebreide bouwbeschrijving moet u toch een aardig eind in de buurt komen.

De elektronica is ondergebracht op twee printen. Op de hoofdprint zitten de schakelingen van de generatoren en de meters, op de voedingsprint uiteraard de voeding.

### De hoofdprint

Figuur 9 geeft de layout van de hoofdprint die alle onderdelen herbergt, op de voeding na. Naast de standaard boringen van 0,8 mm voor de IC's, 1 mm voor de onderdelen en 1,3 mm voor de printsoldeerpenntjes, moet u een aantal grotere gaten boren. Op de eerste plaats 19 gaten van 3,5 mm voor de bevestiging van de print op de frontplaat en het vastschroeven van de 4 mm stekkerbussen. Vervolgens vier 10 mm gaten voor de poten-

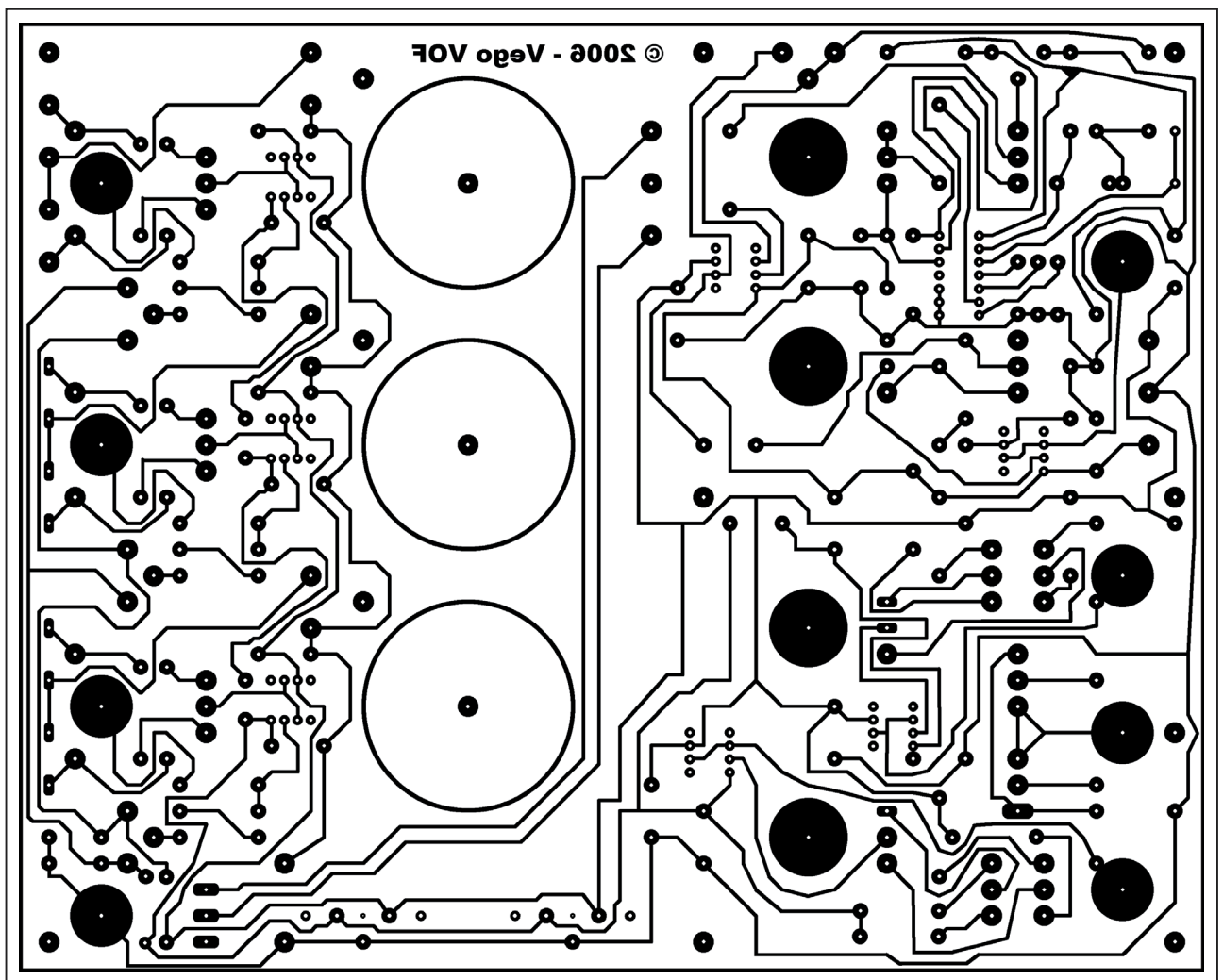


**Figuur 8:** Het prototype van de universele op-amp trainer.

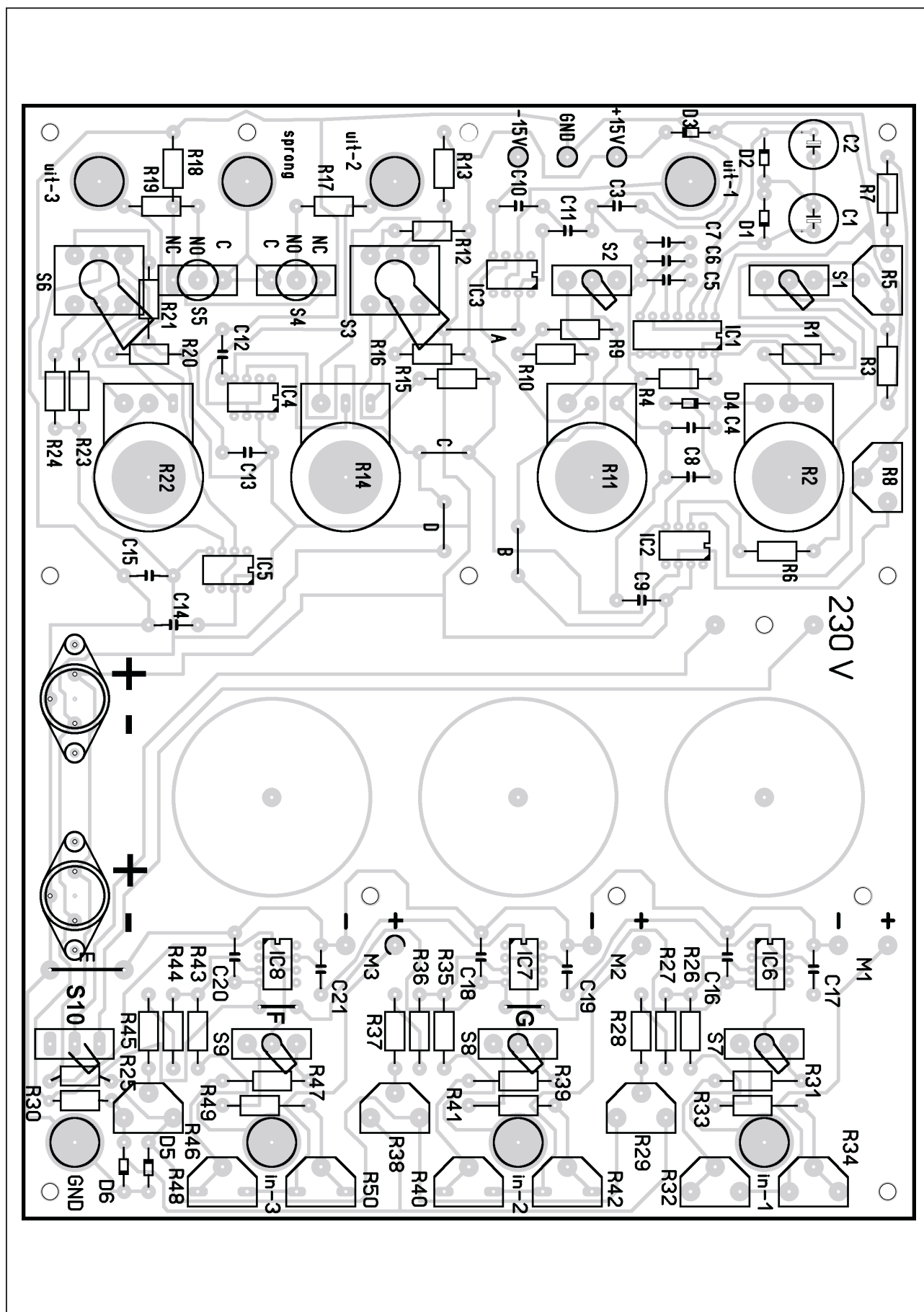
tiometers. Tot slot drie 40 mm gaten voor de meetinstrumenten. Als u niet wilt vijlen, dan

koopt u een gatenzaag van 40 mm, zet deze in de boormachine in de boorstandaard en boort/zaagt mooie ronde gaten in het epoxy van de print. Na deze bewerkingen kan de print bestukt worden volgens figuur 10.

U start met de zeven draadbruggetjes, A tot en met G. Nadien komen de printsoldeerlipjes aan de beurt: drie voedingsaansluitingen (op de print gemerkt met +15 V, -15 V en massa), de twee 230 V gaatjes en de positieve en negatieve aansluitingen van de meetinstrumenten. Vervolgens soldeert u de IC-voetjes en al het kleine grut zoals de dioden, weerstanden, condensatoren, elco's en instelweerstand. De twee 470  $\mu$ F print-elco's (C1 en C2) mogen niet hoger zijn dan 20 mm, de afstand tussen print- en frontplaat. Koop dus exemplaren met een werkspanning van 12 V.

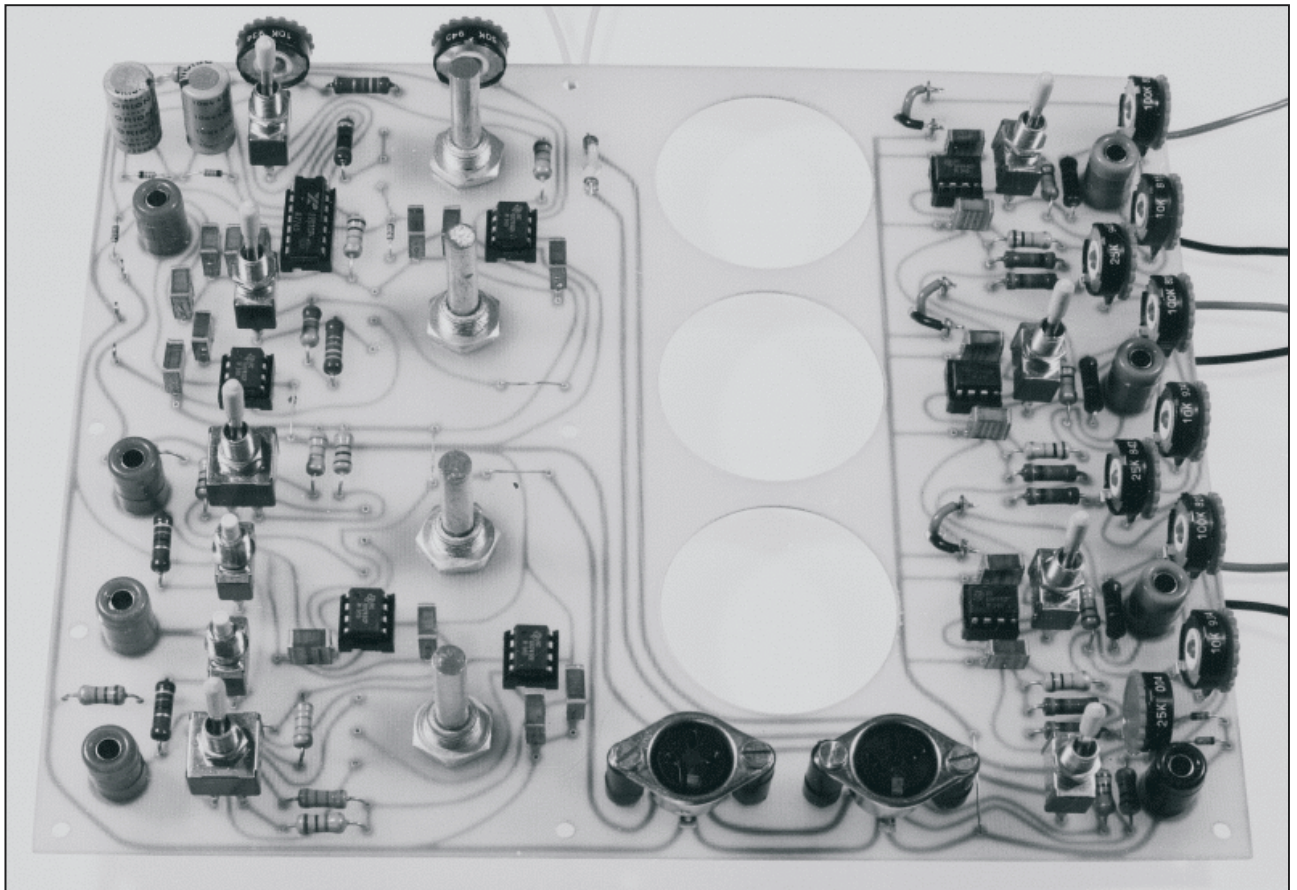


**Figuur 9:** Het ontwerp van de grote hoodprint. Let op! Deze figuur is niet op ware grootte afgebeeld! Zie ook hoofdstuk 33.



**Figuur 10:** De componentenopstelling van de hoofdprint.





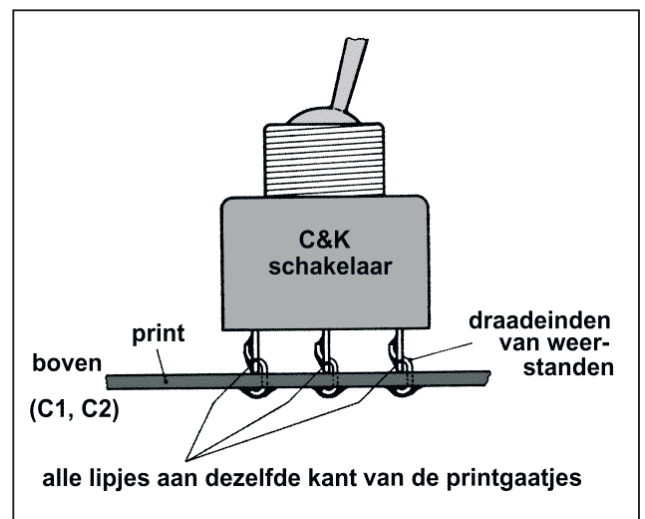
**Figuur 11:** Het prototype van de hoofdprint. Let op! De layout van de print wijkt af van de definitieve versie van figuur 9.

De volledige bestukte print is te bewonderen in figuur 11. Aan de hand van deze figuur, enige detailfoto's en tekeningen kunt u de rest van de onderdelen op de juiste manier onderbrengen.

Eerst komen de schakelaars aan de beurt. U heeft zes enkelpolige omschakelaars, bijvoorbeeld type 7101 van C&K, nodig. Daarnaast twee dubbelpolige omschakelaars, type 7201 en tot slot twee enkelpolige drukschakelaars van het type 8125.

Figuur 12 geeft een impressie van de montage. Soldeer eerst stevige draadjes, bijvoorbeeld de afgeknipte draadeinden van de gemonteerde weerstanden, in de schakelaarlipjes. Attentie: de draadjes moeten allemaal aan dezelfde zijde van de lipjes zitten!

Duw de schakelaars vervolgens in de print en wel zo dat de onderkant van de lipjes worden geprikt als aangegeven in figuur 12. De lipjes moeten aan de bovenkant van de gaatjes staan. Als u een schakelaar omgekeerd bevestigt, dan zit hij 2 mm te laag en past niet

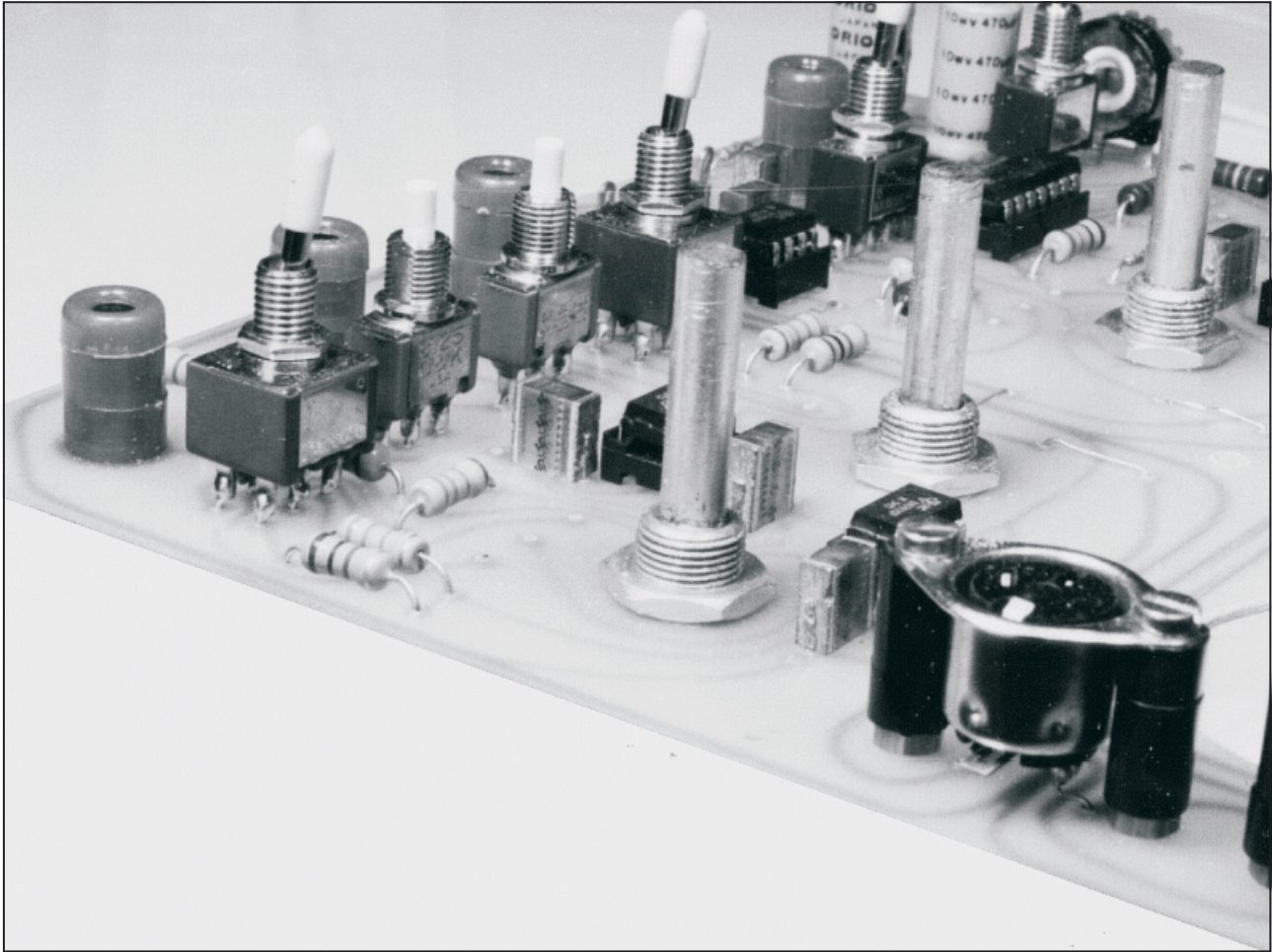


**Figuur 12:** De montage van de schakelaars op de hoofdprint.

meer in het bevestigingsgat van de frontplaat!

De twee drukschakelaars eisen extra aandacht. Let op de positie van de met "c", "no" en "nc" aangeduide contacten, vergelijk met figuur 10! Bovendien mag u deze schake-



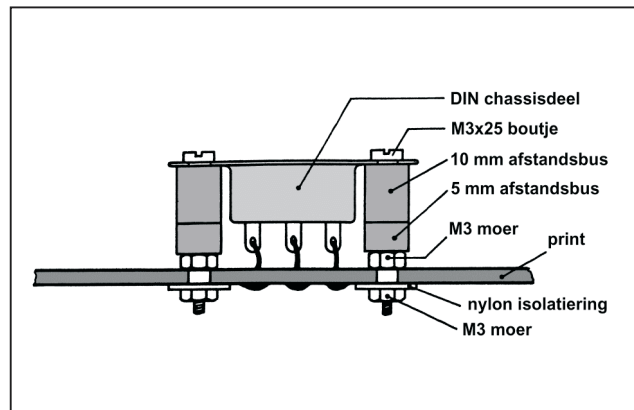


**Figuur 13:** Montage van de schakelaars en de stekkerbussen.

laars niet zo ver mogelijk in de print duwen. De schakelaarlipjes zitten 2 mm van de print af. Figuur 13 geeft een detailbeeld van de montage van de schakelaars. Uit deze foto volgt ook hoe de stekkerbussen op de print komen. Voor ieder gat heeft u de onderdelen van twee stekkerbussen nodig. Het schroefje en het ringetje worden verwijderd en nadien duwt u een extra isolatiebus om het metalen gedeelte. Deze combinatie gaat op de print en wordt aan de koperzijde op het eilandje vastgeschroefd.

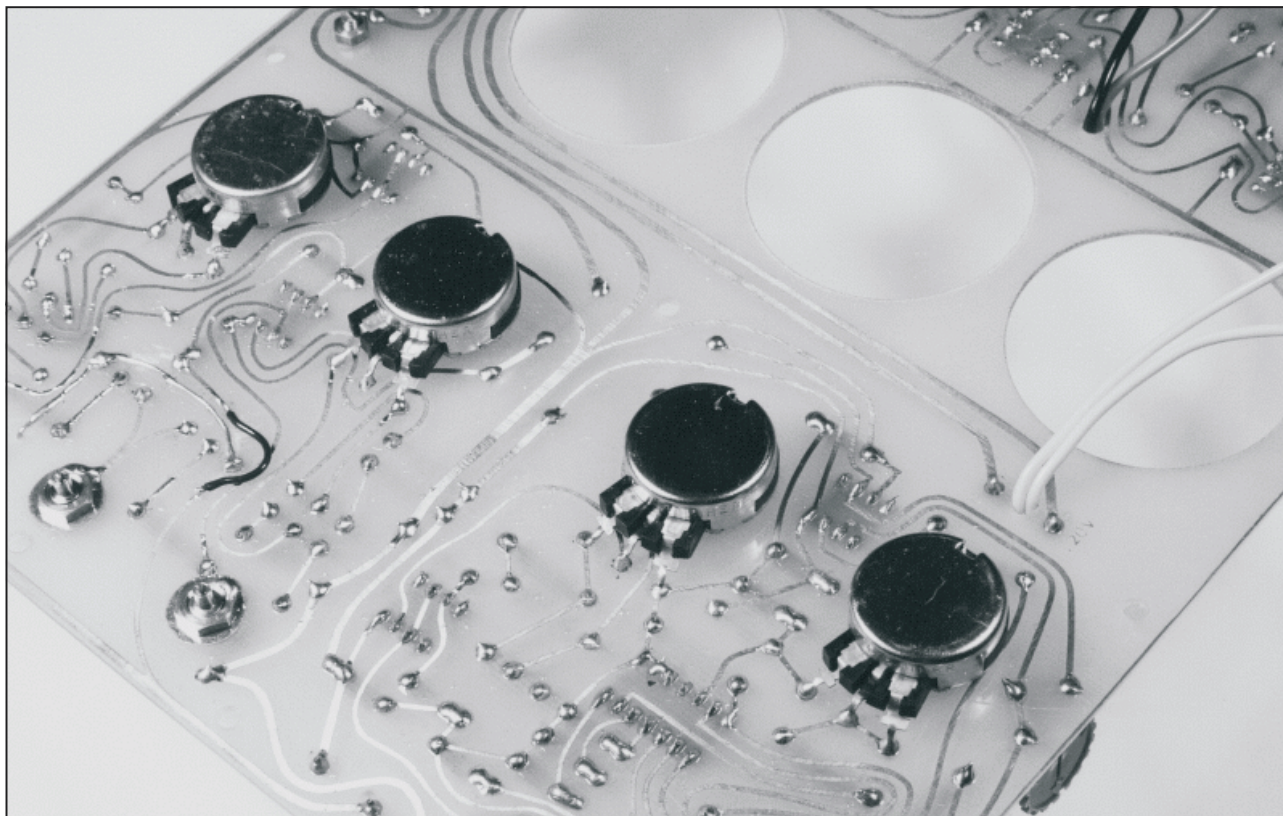
Vervolgens kunt u de twee driepolige DIN-chassisdelen bevestigen, volgens figuur 14. Deze tekening is duidelijk, dachten wij. Let op! Op de foto van figuur 13 is de bus verkeerd om gemonteerd. Ook het sporenpatroon van de print klopt niet met de uiteindelijke lay-out.

Als laatste stap moet u de vier potentiometers bevestigen. Nadat u de assen op de juiste lengte heeft gezaagd (afhankelijk van de



**Figuur 14:** De montage van de twee chassisdelen voor het voeden van de experimenterschakelingen.

knoppen die u gekocht heeft) kunnen ze op de print worden geschroefd en de aansluitlipjes op de koperzijde vastgesoldeerd, volgen figuur 15. Ook op deze foto zit een afwijking in het sporenpatroon. Een printontwerpfout is provisorisch verholpen met wat kraswerk en een draadje.



**Figuur 15:** De montage van de vier draaipotentiometers.

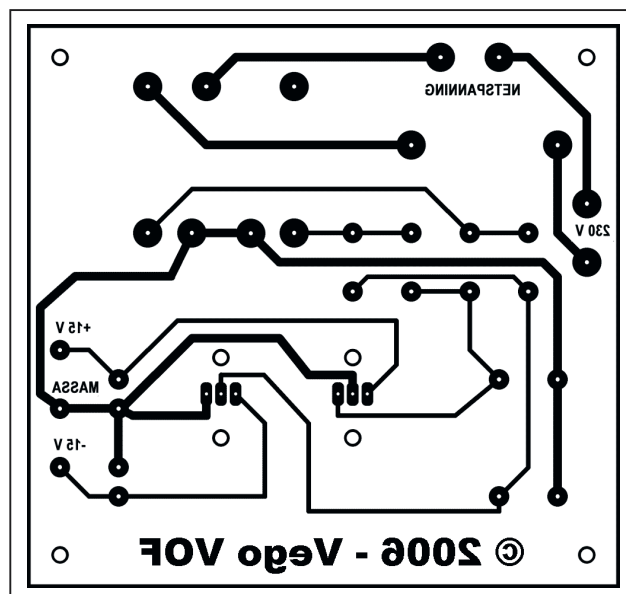
Alvorens u de hoofdprint terzijde legt soldeert u acht soepele draadjes van 15 cm op de printlipjes van de 230 V en de meteraansluitingen. Deze draadjes voert door de 3,5 mm gaatjes tussen de soldeerlipjes naar de koperzijde van de print, zie figuur 11.

### De voedingsprint

De voeding van de trainer zit op een afzonderlijk printje, waarvan figuur 16 het ontwerp toont. Deze print wordt gemonteerd volgens de figuren 17 en 18. Kinderspel! De twee stabilisatoren IC9 en IC10 schroeft u op kleine U-vormige koelprofieltjes.

### Het metaalwerk

De twee printen worden als een soort sandwich aan elkaar en aan de frontplaat bevestigd, waarbij een aluminium montageplaat tussen beide printen wordt opgenomen. Hoe een en ander er uit komt te zien toont figuur 19. De aluminium montageplaat is snel gemaakt: zij is even groot als de hoofdprint en heeft slechts een handjevol gaatjes. Om precies te zijn, elf gaatjes van 3,5 mm voor het doorvoeren van bevestigingsschroeven en

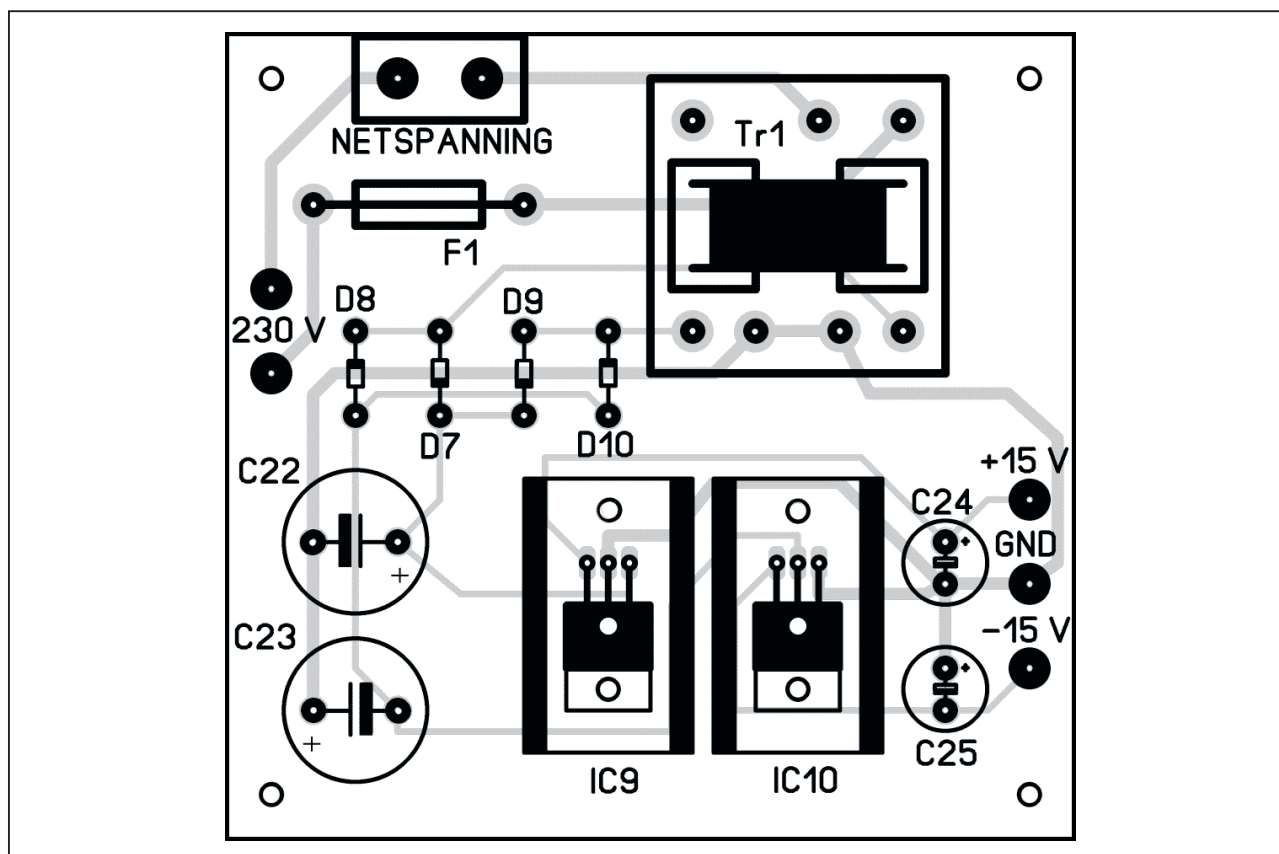


**Figuur 16:** Het ontwerp van de voedingsprint, niet op 1/1 schaal.

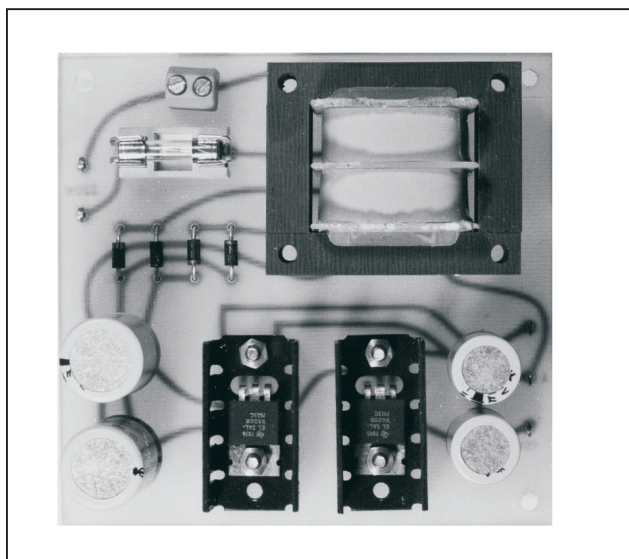
een gat van 10 mm voor het solderen van de 230 V draadjes aan de voedingsprint. In dat gat komt trouwens een rubber tule.

Wel een probleem is de frontplaat. Hoe maakt u als doe het zelf een mooie, professionele frontplaat? Allereerst heeft u een ontwerp nodig, liefst op ware grootte. Nu is





**Figuur 17:** De componentenopstelling van de voedingsprint.

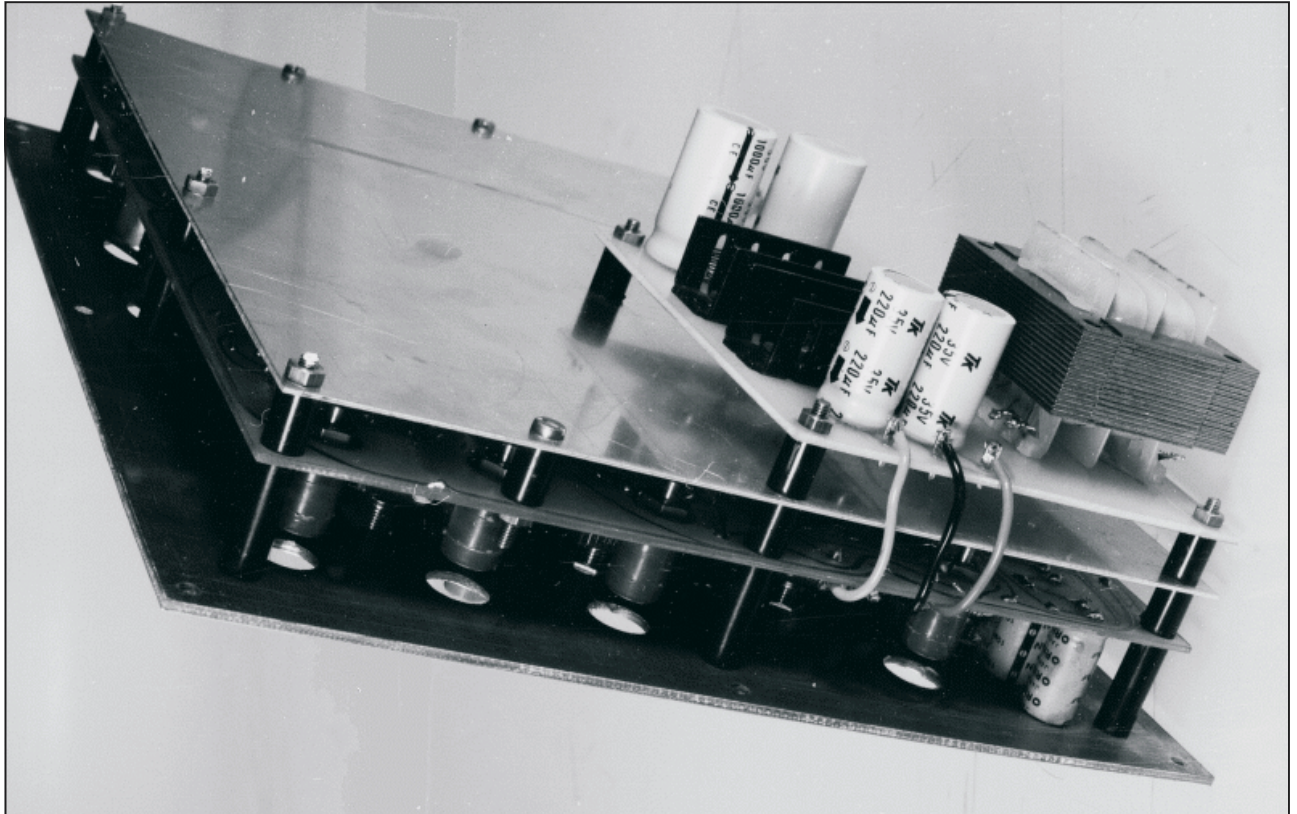


**Figuur 18:** Het prototype van de voedingsprint.

de frontplaat van de op-amp trainer 20 cm bij 24 cm groot en dat is te groot om in dit boek te worden afgedrukt. Vandaar dat figuur 20 verkleind is. Via onze internetsite kunt u het ontwerp echter downloaden. Het zélf afdrukken op een standaard A4 inkjet printer gaat nét. De simpelste procedure om een mooi

frontplaatje te krijgen is de volgende. Download het ontwerp van onze internetsite (zie hoofdstuk 33) en print het TIF-bestand tweemaal op een inkjet printer met als afmetingen 20 cm bij 24,5 cm. Gebruik een stevig soort papier. Plak de eerste afdruk op een plaat aluminium en pons alle middelpunten van alle te boren gaatjes en gaten in het aluminium. Verwijder nu de afdruk en bewerk het plaatje aluminium. Als de frontplaat helemaal klaar is kunt u de tweede afdruk met tweezijdig klevende folie of met lijm uit de spuitbus op het aluminium plakken. Met een zeer scherp hobbymes kunt u nu de grote gaten uit het papier snijden, langs de rand van de gaten in de aluminium frontplaat.

Nog beter en mooier is gebruik te maken van het fotogevoelige en zelfklevende aluminium van 3-M Company, in de handel onder de naam "Scotchcal". De procedure is als volgt. Print het ontwerp af op de speciale transparante film die voor inkjet printers in de handel is. Belicht met deze film een plaatje Scotchcal aluminium, liefst met een hoogtezon. De belichtingstijd is afhankelijk van de



**Figuur 19:** De montage van de twee printen op de aluminium montageplaat en de frontplaat.

afstand tussen lichtbron en fotogevoelig materiaal en kan experimenteel worden bepaald. Gebruik dus enige proefstrookjes voor het bepalen van de juiste belichting. Na ontwikkelen met de bijgeleverde ontwikkelaar ontstaat een aluminiumkleurig frontplaatje met zwarte letters. Het kan natuurlijk voorkomen dat u een zwart frontplaatje met aluminiumkleurige tekst mooier vindt. Dat kan! Laadt het TIF-ontwerp in een grafisch programma en maak het negatief. Druk weer af op transparante film en belicht er het fotogevoelig aluminium mee.

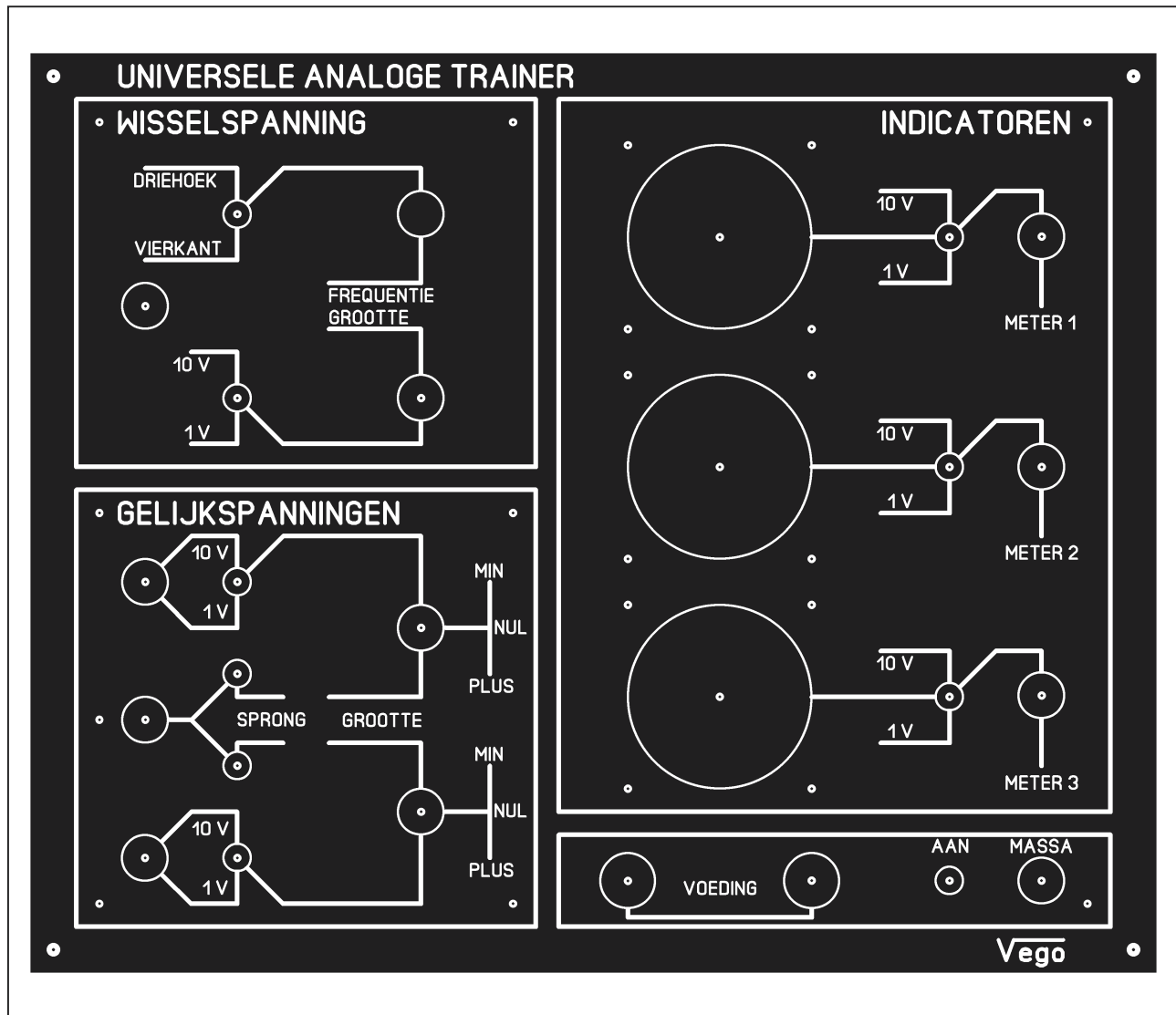
Tip: spuit het Scotchcal plaatje af met transparante en matte vernis. De krasbestendigheid neemt toe en vingervlekken zijn minder zichtbaar. Nog een tip: iedere elektronicazaak verkoopt voor een prikje stukken epoxy printplaat zonder fotolaag. Dit materiaal laat zich gemakkelijker bewerken dan aluminium, het verbuigt niet en er ontstaan geen bramen bij het boren van gaten. Ideaal voor het maken van de frontplaat!

Slottip: vaak is het erg moeilijk grote gaten, zoals voor de DIN-chassisdelen en de stek-

kerbussen, mooi rond te boren, zelfs bij gebruik van een boorstandaard. Boor deze gaten voor met een spiraalboortje van 6 mm en gebruik nadien een zogenaamde plaatboor voor het ruimen van de gaten. Zuiver rond en braamloos!

### De eindmontage

Nu alle ingrediënten aanwezig zijn, kunt u het gerecht van figuur 19 gaan opdienen. De eerste stap is het samenschroeven van frontplaat en hoofdprint. De tekening van figuur 21 geeft weer hoe het moet met lange bouten en 10 mm en 20 mm afstandsbussen. Er komt echter een vertragende factor om de hoek kijken. De schaaltes van de meetinstrumenten zijn geïkt in  $\mu\text{A}$  en dat kan natuurlijk niet. Dus: schaaltes voorzichtig uit de meters halen (twee kleine schroefjes), met een scherp mesje met ronde punt de ongewenste cijfers wegschrappen (de schaalindeling blijft natuurlijk staan) en met zelfklevende cijfers een nieuw schaalte ontwerpen volgens figuur 3. Dat gaat echt goed: de zwarte cijfers zijn fabrieksmatig op het witgeschil-



**Figuur 20:** Het (verkleinde) ontwerp van de frontplaat.

derde schaalteje gezeefd en de zwarte verf laat makkelijk los, zonder de witte laag te beschadigen.

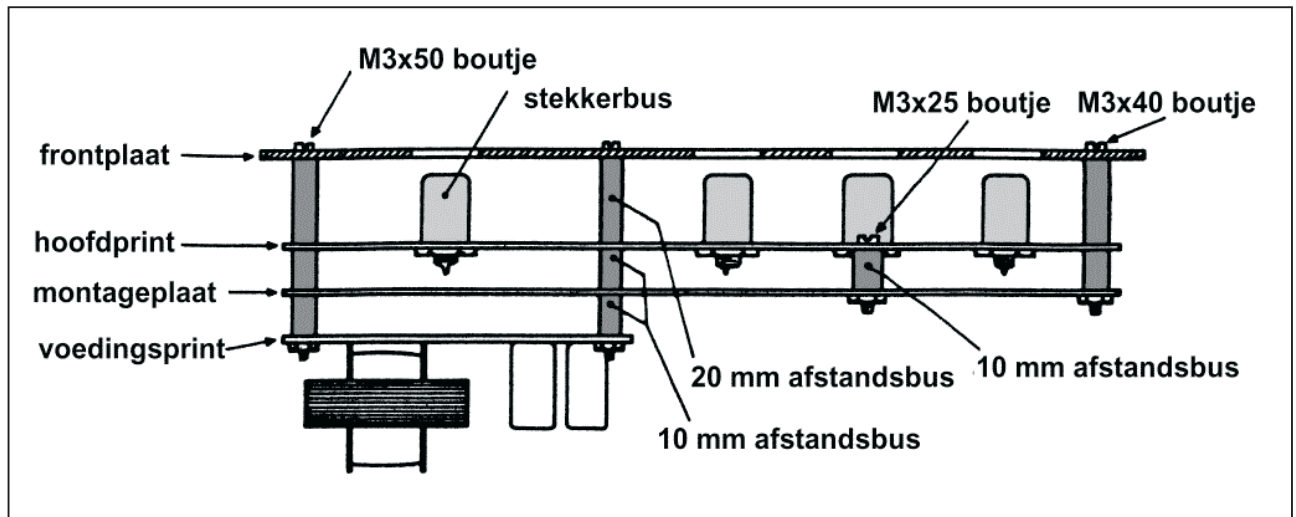
Nadat de schaaltejes weer op hun plaats zitten en de meetinstrumenten door middel van de vier bijgeleverde schroefjes op de frontplaat zijn bevestigd, kunt u frontplaat en hoofdprint verenigen, zie figuur 21. Als alles goed is gegaan, dan passen alle schakelaars precies in de gaatjes en staan de DIN- en stekkerbussen precies onder de gaten van de frontplaat. De assen van de schakelaars steken zelfs twee mm uit en door middel van de bijgeleverde moeren draait u de zaak vast. U kunt nu de meetinstrumenten aansluiten, zie figuur 22. Nu staat niets u in de weg (behalve misschien een vers kopje koffie) om de printencombinatie te voltooien.

De M3-moertjes, gebruikt voor de provisorische bevestiging van print op front worden verwijderd, op de schroeven komen 10 mm lange afstandsbusen en daarop de aluminium montageplaat.

LET OP: voer de twee draadjes van de 230 V soldeerlipjes van de hoofdprint door de rubber tule.

Vervolgens kunt u een groot aantal schroeven met M3-moertjes zekeren. Vier blijven nog even open, daar komen weer 10 mm afstandsbusjes overheen en nadien de voedingsprint. Dan kunt u ook die schroeven vastdraaien. Op drie punten brengt u extra steunschroeven aan tussen hoofdprint en montageplaat, natuurlijk met tussenschakeling van afstandsbusjes. Deze schroeven voorkomen mechanische belasting van de





**Figuur 21:** De montage van de twee printplaten op de frontplaat en de ondersteunende montageplaat.



**Figuur 22:** Het aansluiten van de drie draaispoelmeters.

print bij het induwen van banaanstekkers in de stekkerbussen.

De twee printen worden nu verbonden. De 230 V draadjes aan de ene kant van de voedingsprint en drie draadjes van de +15 V, -15 V en massa aansluitingen van de ene

print gaan naar de gelijknamige aansluitingen van de andere print. De op-amp trainer is klaar om afgeregeld te worden!

## Het in bedrijf stellen

### Afregelen

Verbindt een netkabel met het printkroonsteentje op de voedingsprint en schakel het apparaat in. De drie meters zullen waarschijnlijk iets afwijkend van nul aanwijzen. Laat het apparaat een kwartiertje opwarmen en regels als volgt af.

#### – Nulstellen van de meters

Zet de bereikenschakelaars op 1 V en verdraai de instelpotentiometers R29, R38 en R46 tot de meters 0 V aanduiden.

#### – IJking van de meetbereiken

Sluit de drie ingangsbussen van de meters parallel aan op een van de uitgangen van de gelijkspanning. Sluit op deze uitgang bovendien een geijkte universeelmeter aan. Zet de bereikenschakelaars op 10 V en stel de uitgangsspanning van de trainer in op +10 V. Verdraai de instelpotentiometers R34, R42 en R50 tot alle meters +10 V aanwijzen.

Zet vervolgens alle bereikomschakelaars op 1 V en verdraai de potentiometer tot de uitgangsspanning van de trainer +1 V bedraagt. Regel R32, R40 en R48 af tot volle



schaalaanduiding op de meetinstrumenten.

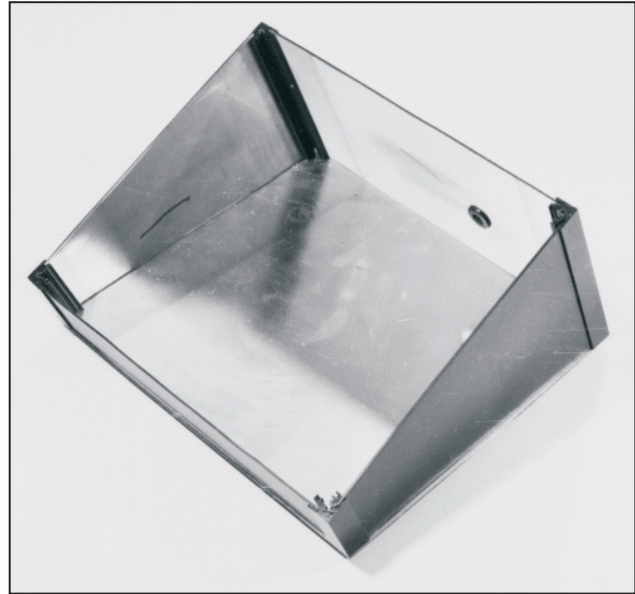
- Afregeling van de frequentiegenerator  
Sluit de uitgang van de functiegenerator aan op een van de meters. Zet de “Grootte”-potentiometer maximaal open en de bereikenknop op 10 V. Als u de functieknop op de stand “Driehoek” zet en de frequentieknop in de middenstand, dan zal de naald van de meter langzaam heen en weer gaan tussen ongeveer -10 V en +10 V. Regel R8 af, tot die grenzen bereikt of niet meer overschreven worden. Er kan een kleine asymmetrie in het uitgangssignaal zitten, wat zich uit in bijvoorbeeld een iets lagere negatieve maximale spanning dan positief. Dit wordt veroorzaakt door het IC, is niet te verhelpen en bovendien geen probleem. Schakel nadien de functieschakelaar op “Vierkant” en regel R5 af op een spanningszwaai van -10 V naar +10 V. Ook hier kan een kleine asymmetrie aanwezig zijn.

### De behuizing

Een mooie schakeling wil in een fraaie behuizing ondergebracht worden, zodoende hebben we aan de kast van de trainer de nodige aandacht besteed. Wat we willen bereiken is afgebeeld in figuur 23: een mooie zwarte kast met hellend front, zodat de trainer gemakkelijk te bedienen en af te lezen is.

Vroeger zou het maken van zo’n kast een heel probleem zijn, nu gaat dat erg simpel. Er bestaat immers een speciaal aluminium hoekprofiel, waarin 1 mm aluminium wandplaten te bevestigen zijn. Het enige dat u moet doen is een aantal aluminium platen op maat zagen, vier stukjes profiel van de juiste lengte zagen en de kast in elkaar zetten. Figuur 24 geeft alle nodige informatie.

Weer een tip: in plaats van zagen kunt u de 1 mm dikke aluminiumplaat ook breken. Dat gaat als volgt. Teken eerst de afmetingen af. Kerf nadien aan beide zijden flink in met een Stanly-mes (denk om uw vingers) langs een metalen lat. Leg de plaat vervolgens met de kerf op de rand van de tafel. Buig de plaat voorzichtig heen en weer. Na enige malen buigen breekt het aluminium keurig op de



**Figuur 23:** De behuizing waarin het prototype werd ondergebracht.

kerf. Even naschuren met grof schuurpapier en u heeft een kaarsrechte rand.

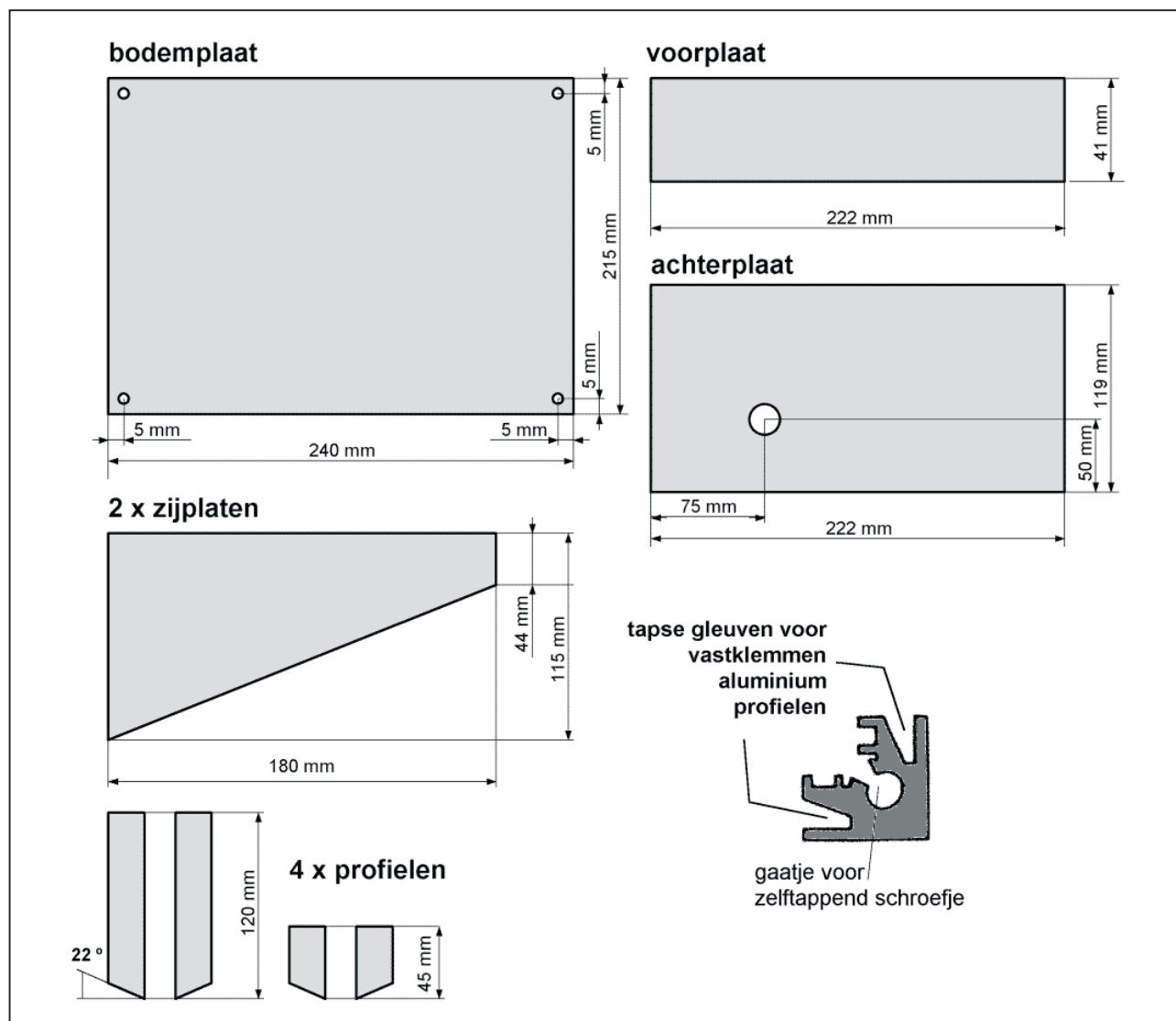
Nadat alle platen en de profielen op maat zijn gemaakt en zorgvuldig geschuurd, kunt u alles met spuitbusverf afwerken. Kies matte verf, stofjes vallen dan niet zo erg op. Vervolgens worden de delen provisorisch in de profielen geklemd en kunt u de bodemplaat met zelftappers vastschroeven. Tot slot wordt de printencombinatie volgens figuur 25 gemonteerd.

## De 741 experimenteerprint

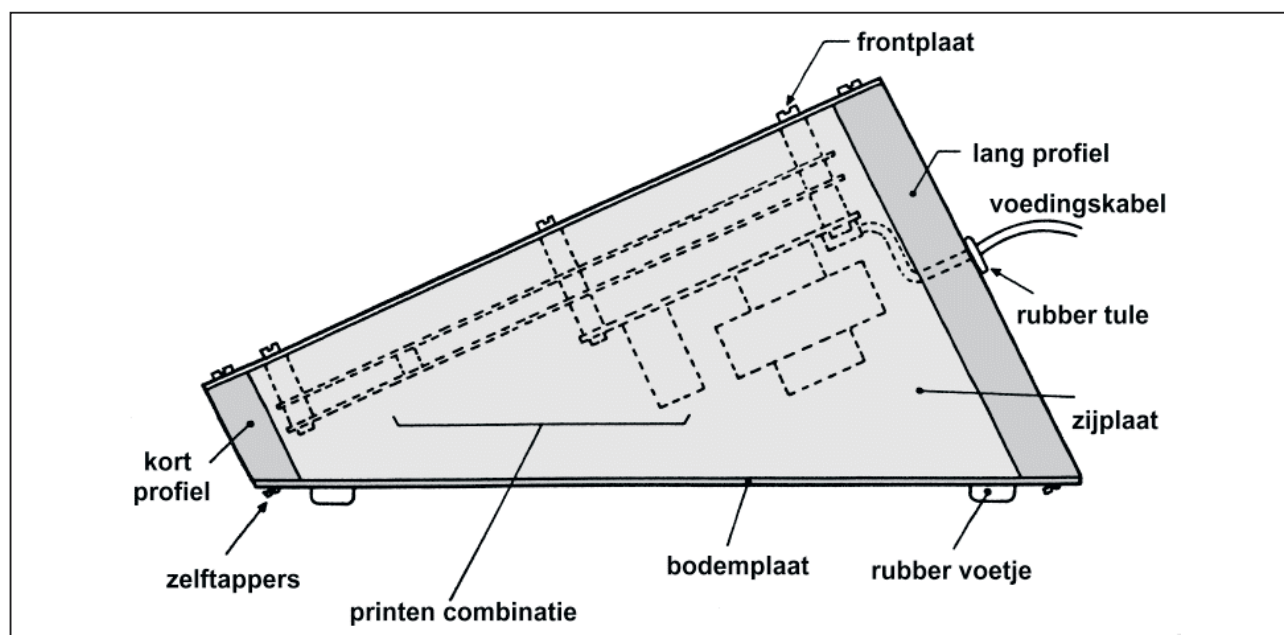
### Inleiding

Weliswaar is uw universele op-amp trainer klaar voor gebruik, maar zonder experimenteerprintje heeft u er nog niet veel plezier van.

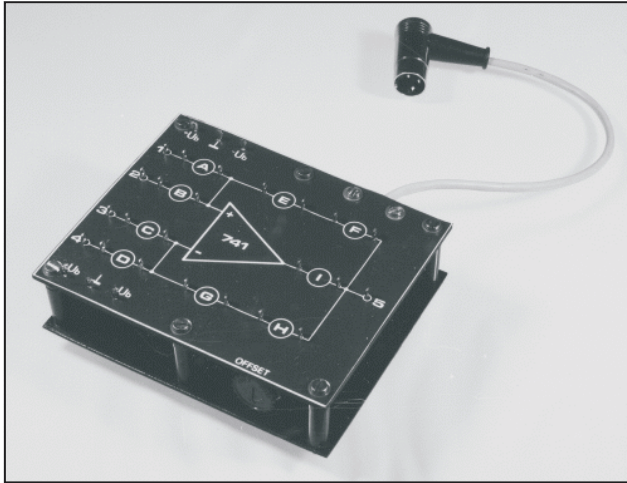
Met dat experimenteerprintje kunt u schakelingen opbouwen rond een operationele versterker. Ook hieraan hebben we de nodige zorg besteed, kijk maar naar figuur 26, waar het experimenteerprintje voor de in de inleiding genoemde experimenten wordt gepresenteerd. Of, beter gezegd, een van de experimenteerprintjes, want sommige experimenten eisen twee op-amp's en dus ook twee printjes.



**Figuur 24:** De afmetingen van de aluminium platen van de behuizing.



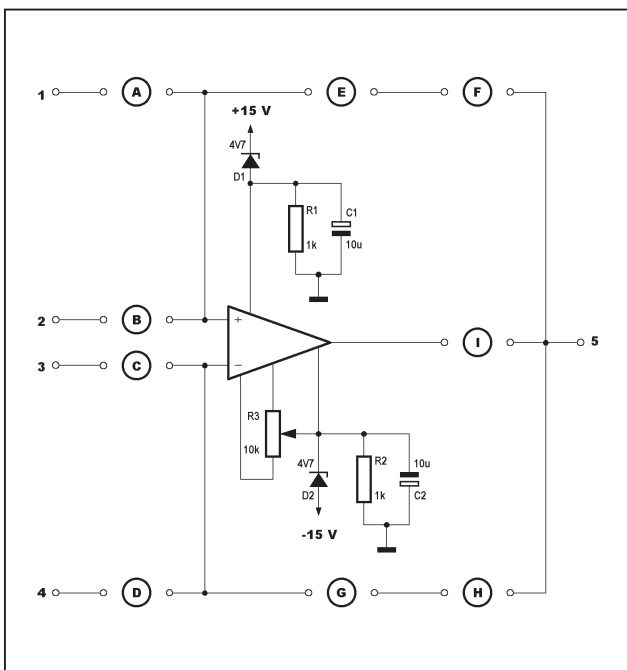
**Figuur 25:** Eindmontage van de universele op-amp trainer.



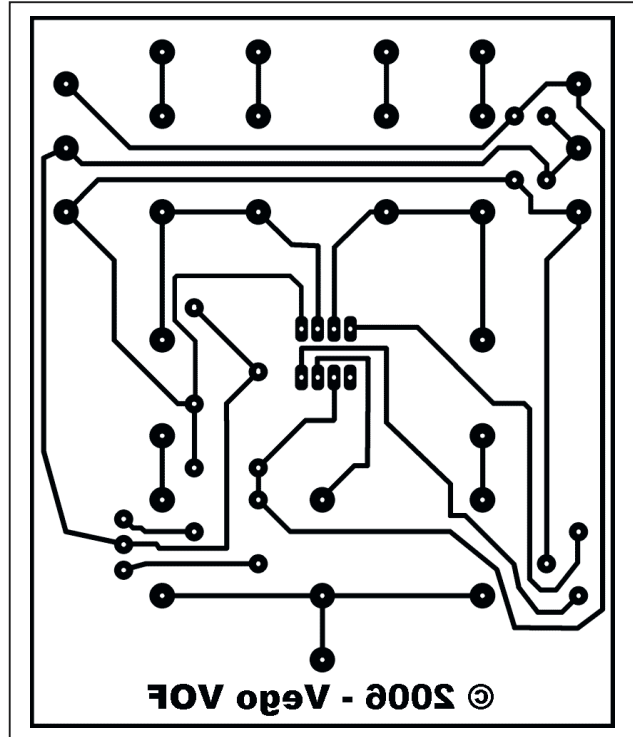
**Figuur 26:** Een van de twee experimenteerprintjes die u nodig heeft voor het uitvoeren van alle in dit boek beschreven experimenten.

### Het schema

Het printje bevat een 741 op-amp, enige onderdelen voor de voeding van het onderdeel en verder een groot aantal soldeerlipjes, waarop u de experimenteerschakeling bouwt. De genoemde onderdelen zitten **op de koperzijde** van de print, de andere zijde is voorzien van een afdrukje waarop een universeel schema rond de op-amp is getekend. Het schakelingetje is getekend in figuur 27.



**Figuur 27:** Het schakelingetje op de experimenteerprint.



**Figuur 28:** De experimenteerprint, ware afmetingen 90 mm bij 110 mm.

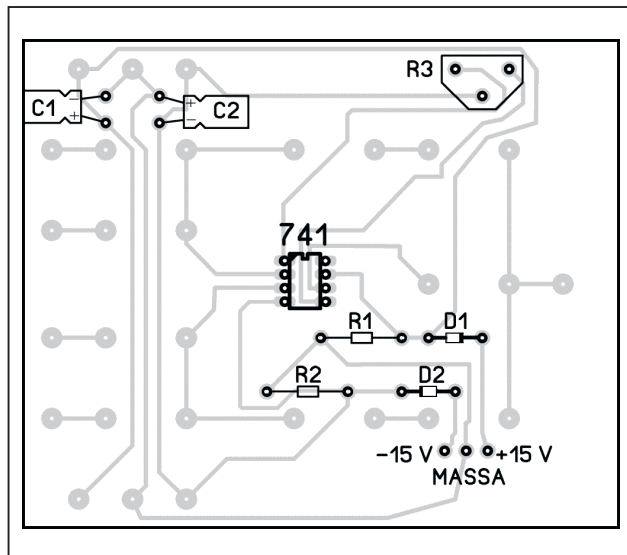
De voedingsaansluitingen van de op-amp worden niet rechtstreeks gevoed uit de beschikbare  $\pm 15$  V. Deze spanningen worden door twee zenerdioden gereduceerd tot ongeveer  $\pm 10$  V. Bij een aantal experimenten wordt de op-amp namelijk volledig uitgestuurd, hetgeen tot gevolg heeft dat de uitgangsspanning ongeveer gelijk wordt aan de voedingsspanning. Bij voeding met 15 V zou dat ongeveer 13 V zijn, een spanning die onze meters niet kunnen verwerken. De naalden zouden in de hoek slaan! Vandaar de enigszins gereduceerde voedingsspanning, zodat de uitgang van de op-amp nooit groter of kleiner dan  $\pm 10$  V kan worden.

Twee elcootjes zorgen voor de ont koppeling van de voedingsspanningen, terwijl twee 1 k $\Omega$  weerstanden een permanente stroom door de zeners sturen, hetgeen de stabiliteit van de spanningen bevordert.

Naast de twee weerstanden, elco's en zeners is een instelpotentiometertje aanwezig, waarmee u de offset van de op-amp kunt weggeregelen. Bovendien is nog plaats voor een aantal componenten, gemerkt van A tot en met I, die al dan niet gevuld wordt bij de diverse experimenten.

### De bouw van de experimenteerprint

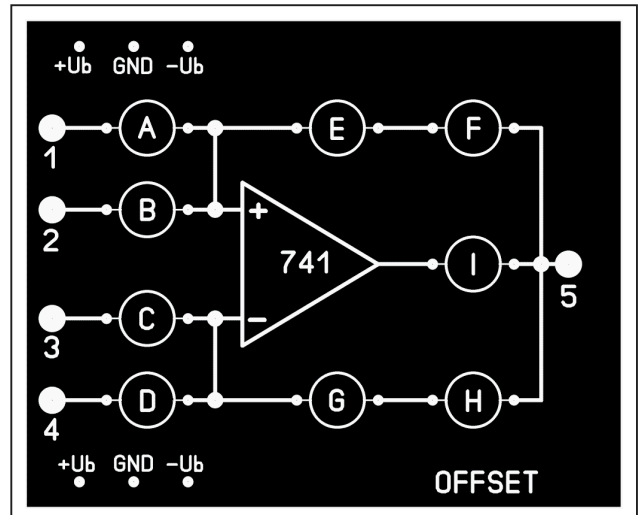
Het printontwerp is getekend in figuur 28, de bestukking valt uit figuur 29. Eerst moet u echter het frontplaatje maken en op de print plakken. Het ontwerp, niet op ware grootte, is te bewonderen in figuur 30. Dit kan op de reeds beschreven manier gedownload worden en afgedrukt op uw inkjet printer met als afmetingen 11 cm bij 9 cm.



**Figuur 29:** Bij de experimenteerprint worden de onderdelen op de **koperszijde** van de print gesoldeerd.

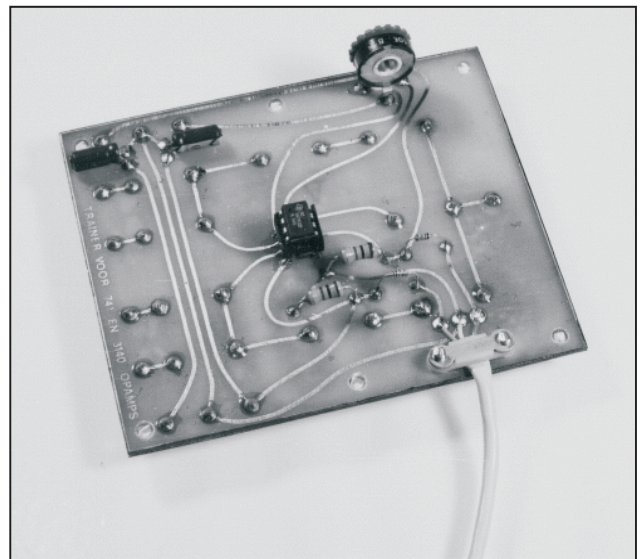
De acht onderdeeljes kunt u vervolgens **op de koperkant van de print solderen**, waarbij niet te lang verhitten de boodschap is. Als het epoxy te warm wordt, dan gaan er gasen ontstaan in de lijm waarmee de afdruk op de print is geplakt met als resultaat lelijke puisten. Nadien volgen 29 printsoldeerlipjes en deze komen uiteraard wel aan de “goede” kant van de print. De voedingsaansluitingen worden verbonden met de analoge trainer door middel van een drie-aderig kabeltje en een DIN-stekker. Een exemplaar, waarbij de draad de stekker aan de zijkant verlaat geniet de voorkeur. De drie aders van het kabeltje soldeert u ook weer op de koperkant van de experimenteerprint. Een trekontlasting, gesloopt uit een netstekker, zekert de kabel tegen mechanische trekbelasting.

Figuur 31 geeft een visie op de gemonteerde experimenteerprint. Het eindresultaat wordt perfect als u nog een aluminiumplaatje



**Figuur 30:** Het frontplaat ontwerp van de experimenteerprint.

maakt ter grootte van de print en dit met 25 mm afstandsbusjes onder het printje schroeft.



**Figuur 31:** Het prototype van de experimenteerprint.

### Het einde komt in zicht!

Als allerlaatste bewerking moet u vijf experimenteer-kabeltjes maken met aan de ene kant een banaanstekker en aan de andere een krokodilbek klemmetje. De stekkers gaan naar de trainer, met de krokodilklem sluit u het kabeltje aan op een van de soldeerlipjes van de experimenteerprint.



## ONDERDELENLIJST UNIVERSELE ANALOGE TRAINER

### WEERSTANDEN, 1/4 W, 5 %

R1 . . . . .	4,7	kΩ
R3 . . . . .	1,8	kΩ
R4,R26,R35,R43 . . . . .	10	kΩ
R6,R7,R9,R10 . . . . .	22	kΩ
R12,R15,R18,R21,R24,R25,R30 . . . . .	1	kΩ
R13,R16,R20,R23 . . . . .	33	kΩ
R17,R19 . . . . .	47	Ω
R27,R28,R36,R37,R44,R45 . . . . .	10	MΩ
R31,R39,R47 . . . . .	15	kΩ
R33,R41,R49 . . . . .	150	kΩ

### INSTELPOTENTIOMETERS, 5 x 10 mm STAAND

R5,R32,R40,R48 . . . . .	10	kΩ
R8,R29,R38,R46 . . . . .	50	kΩ
R34,R42,R50 . . . . .	100	kΩ

### DRAAIPOTENTIOMETERS, MONO, LINEAIR

R2 . . . . .	5	kΩ
R11,R14,R22 . . . . .	500	kΩ

### CONDENSATOREN

C1,C2 . . . . .	470	μF	15 V printelco
C3-C21 . . . . .	100	nF	MKH
C22,C23 . . . . .	1000	μF	35 V printelco
C24,C25 . . . . .	100	μF	20 V printelco

### HALFGELEIDERS

D1,D2 . . . . .	1N4148
D3,D4 . . . . .	4,7 V, 400 mW zenerdiode
D5,D6 . . . . .	2,7 V, 400 mW zenerdiode
D7-D10 . . . . .	1N4004
IC1 . . . . .	XR2207
IC2-IC8 . . . . .	741, mini-DIL
IC9 . . . . .	7815
IC10 . . . . .	7915

### DIVERSEN

6 . . . . .	schakelaar 7101, C&K
2 . . . . .	schakelaar 7201, C&K
2 . . . . .	schakelaar 8125, C&K
1 . . . . .	trafo, 2 x 18 V, 2 x 200 mA
1 . . . . .	IC-voet, 14 pennen
7 . . . . .	IC-voet, 8 pennen
2 . . . . .	rubberen doorvoertule, 15 mm

11	instelwielletjes voor instelpotmeters
16	4 mm stekkerbussen
2	DIN chassisdeel, 3-polig
3	draaispoelmeters, Monacor type 2
2	koelplaatje voor TO-220
2	knopje voor 8125 schakelaar
4	pijlknoop voor 6 mm as
16	printsoldeerlipje
1	netkabel met aangegoten stekker
1	printzekeringhouder
1	zekering 300 mA
1	printkroonsteentje, 2-polig
4	M3x10 boutje
7	M3x25 boutje
5	M3x40 boutje
3	M3x50 boutje
32	M3 moertje
8	zelftappers, 3 mm
4	5 mm afstandsbusje
19	10 mm afstandsbusje
8	20 mm afstandsbusje
2	nylon isolatiering voor M3

## ONDERDELENLIJST EXPERIMENTEERPRINT

2	1	k $\Omega$	1/4 W weerstand
2	4,7	V	400 mW zenerdiode
2	10	$\mu$ F	25 V printelco
1	10	k $\Omega$	instelpotentiometer
1			IC-voetje, 8 pennen
1			741, mini-DIL
1			DIN-steker, 3-polig
29			printsoldeerlipje
6			M3x35 boutje
6			5 mm afstandsbusje
6			20 mm afstandsbusje
6			M3 moertje
8			nylon isolatiering, M3
1			trekontlating uit netstekker





## 2 Kennismaking met de 741 op-amp

### De meest populaire op-amp ooit ontworpen

In hoofdstuk 1 heeft u al kennis gemaakt met de 741, een van de meest universele en populaire operationele versterkers (op-amp's) die ooit op de markt zijn gezet. U heeft er namelijk negen op de diverse printen van de universele op-amp trainer gesoldeerd. Over dit kleine, achtpotige onderdeelje gaan de hoofdstukken 2 tot en met 32 van dit boek.

Aan de hand van eenvoudige experimenten gaan wij u leren hoe u met deze chip allerlei soorten schakelingen kunt ontwerpen. Schakelingen, die de basis vormen van de analoge elektronica, dát deel van de elektronica waar u werkt met spanningen die alle mogelijke waarden kunnen hebben. Ondanks de digitale revolutie speelt deze analoge elektronica nog steeds een belangrijke rol. U kunt geen elektronisch apparaat bedenken of er zit wel analoge elektronica in. En de kans is groot dat de ontwerpers van die elektronica minstens een paar op-amp'jes in dit ontwerp hebben toegepast. Of dat nu een oeroude 741 of een modern type is doet er niet toe. Alle op-amp's werken identiek en als u, na het doorworstelen van dit boek, een aardig complexe schakeling met 741's kunt ontwerpen, dan kunt u dat ook met gelijk welke andere op-amp.

### Al experimenterend leren

Alle experimenten worden opgebouwd op maximaal twee van de in hoofdstuk 1 beschreven universele experimenteerprintjes. Op iedere print heeft u al een op-amp van het type 741 gesoldeerd. Wij gaan de in- en uitgangen van deze 741 door middel van weerstanden, condensatoren en dioden omvormen tot een schakeling die "iets" doet. Dat "iets" kunt u leren begrijpen door spanningen aan de schakeling te leggen en de reactie van de schakeling te observeren op de drie meters van uw trainer.

Bij sommige experimenten sluiten wij het hoofdstuk af met een lege grafiek, waarin u de meetwaarden van uw experimenten kunt invullen. Op deze manier leert u de samenhang tussen in- en uitgangsspanningen al spelenderwijs begrijpen.

Uiteraard kunt u de beschreven schakelingen zonder meer ook rond andere (moderne en betere) typen op-amp's opbouwen in uw eigen schakelingen. Omdat op-amp's, op dit niveau, vrijwel identieke eigenschappen hebben, zullen uw schakelingen gegarandeerd werken.

### Wat is een op-amp?

Overbodige vraag, misschien, maar een boek zoals dit hoort nu eenmaal met het antwoord op deze vraag te starten. En, wie weet, misschien steekt u er toch nog iets van op. Een operationele versterker is een geïntegreerde schakeling, opgebouwd uit weerstanden, dioden, transistoren en soms een condensatortje, die door haar interne structuur ideaal is voor het versterken van spanningen.

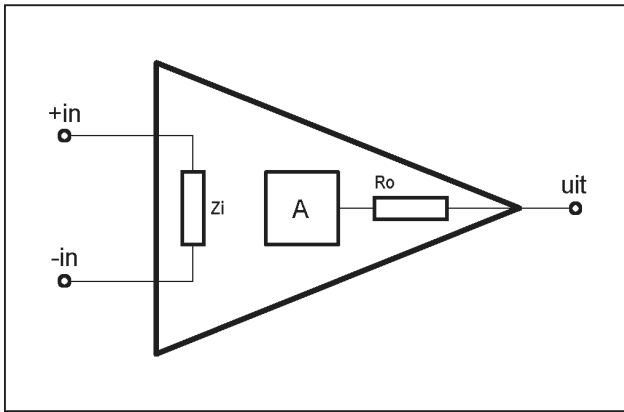
Naast de noodzakelijke voedingsaansluitingen en enige hulpaansluitingen heeft een op-amp steeds twee ingangen en een uitgang. Eén ingang noemt men de niet-inverterende of positieve ingang, de ander is de inverterende of negatieve ingang. Een op-amp is in wezen een verschilversterker: hij versterkt het spanningsverschil dat optreedt tussen zijn beide ingangen.

### Eigenschappen

Een operationele versterker wordt gekenmerkt door een aantal eigenschappen, die schematisch voorgesteld worden in figuur 32.

### De versterkingsfactor

In de eerste plaats krijgt u te maken met de versterkingsfactor A, een waarde die aan-



**Figuur 32:** Het driehoekige symbool van een op-amp, met erin getekend de belangrijkste karakteristieke grootheden.

duidt hoe vaak de op-amp het spanningsverschil tussen beide ingangen versterkt. De waarde van die versterkingsfactor van de op-amp zelf (die men dan ook vaak de open-lus versterkingsfactor noemt, dus de versterking zonder beïnvloeding door schakelingen rond het IC) is zeer groot. Hoe groter, hoe beter en vandaar dat er op-amp's in de handel zijn die liefst een half miljoen maal versterken! Een "normale" op-amp, zoals de 741, is wat bescheidener: zijn open-lus versterking ligt rond de 200.000. Dat is een onvoorstelbaar grote waarde: een spanningsverschil van 1 mV tussen de ingangen zou theoretisch tot een uitgangsspanning van 200 V leiden, als de op-amp dergelijke spanningen zou kunnen opwekken! In de praktijk moet u dan ook meestal maatregelen treffen om de versterking van de schakeling aan banden te leggen.

### De ingangsimpedantie

De tweede belangrijke grootheid is de ingangsimpedantie, in figuur 32 voorgesteld door  $Z_i$ . Dat is de schijnbare weerstand die men tussen de beide ingangen aanwezig acht. Het heeft geen zin een ohmmeter aan te sluiten, de genoemde grootheid is wél aanwezig, maar niet met een dergelijke methode te meten.  $Z_i$  is dan ook niet onder de vorm van een weerstandje in het IC aanwezig, maar is het resultaat van de werking van de ingangstrap van de schakeling. De ingangsimpedantie bepaalt wel de "last" die voorgaande schakelingen van het IC ondervin-

den. Is  $Z_i$  laag, dan zal het IC een grote stroom trekken uit de voorgaande schakeling, hetgeen natuurlijk niet zo ideaal is. Vandaar dat ook deze grootheid van op-amp's zo groot mogelijk moet zijn. Tegenwoordig maakt men operationele versterkers met een  $Z_i$  van 15.000 M $\Omega$ ! Dat zijn de zogenaamde BiMOS versterkers, opgebouwd met FET's aan de ingang. De 741 is ook hier vrij bescheiden: de ingangsimpedantie is "slechts" 2 M $\Omega$ .

### De uitgangsweerstand

Een laatste belangrijke eigenschap is de uitgangsweerstand  $R_o$ . Ook dit is een schijnbare weerstand, niet als dusdanig aanwezig, maar zich uitend als de uitgang van het IC wordt belast. Deze belasting (bijvoorbeeld een volgende trap) vraagt stroom van de op-amp en het gevolg is dat over de  $R_o$  een spanning valt. De uitgangsspanning van de op-amp daalt. Hoe lager de uitgangsweerstand, hoe kleiner de spanningsdaling en hoe minder problemen er kunnen ontstaan. Vandaar de eis dat  $R_o$  zo laag mogelijk moet zijn. Voor de 741 geldt een bescheiden waarde van 75  $\Omega$ .

### Samenvatting

Samengevat kunt u besluiten dat een operationele versterker wordt bepaald door:

- zijn versterkingsfactor  $A$ , die zo groot mogelijk moet zijn;
- zijn ingangsimpedantie  $Z_i$ , die ook zo groot mogelijk moet zijn;
- zijn uitgangsweerstand  $R_o$ , die zo laag mogelijk moet zijn.

### De sturing van een op-amp

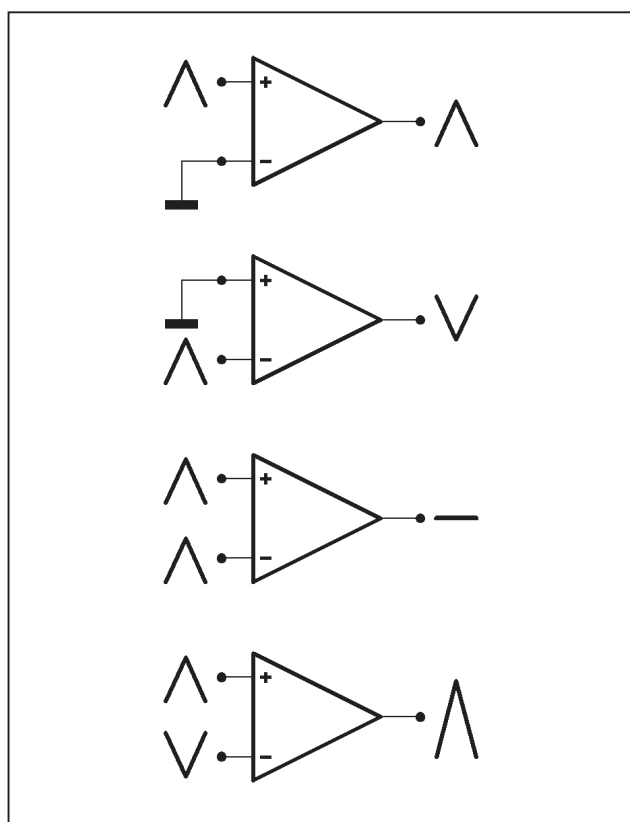
Meestal wordt een op-amp symmetrisch gevoed. Dat wil zeggen dat u op de positieve voedingsaansluiting een positieve spanning ten opzicht van de massa aansluit en op de negatieve voedingspen een negatieve spanning ten opzicht van massa, die in absolute waarde even groot zijn. Typisch waarden zijn  $\pm 12$  V of  $\pm 15$  V.

Onder invloed van de spanningen op de ingangen kan de spanning op de uitgang van de op-amp variëren tussen de beide voe-

dingsspanningen, men spreekt dan van een symmetrische uitsturing van het IC.

Uit het feit dat een op-amp twee ingangen heeft, volgt dat u de schakeling op vier verschillende manieren kunt aansturen. Deze zijn getekend in figuur 33.

- Als de negatieve ingang met de massa wordt verbonden en het te versterken signaal aan de positieve ingang wordt aangeboden, dan zal de uitgang in fase met de ingangsspanning variëren. Als de ingangsspanning stijgt, dan zal ook de uitgangsspanning stijgen.



**Figuur 33:** De vier verschillende sturingsmogelijkheden van een operationele versterker.

- Legt u de positieve ingang aan de massa en voert u het ingangssignaal toe aan de negatieve ingang, dan zal de uitgangsspanning in tegenfase zijn met de ingang. Stijgt de ingangsspanning, dan zal de uitgangsspanning dalen.
- Een derde sturing gaat uit van de gelijke spanningen op beide ingangen. Omdat de op-amp een verschilversterker is en er in dat geval geen spanningsverschil tussen

beide ingangen bestaat, zal de uitgang geen signaal leveren.

- De vierde sturing gaat uit van tegengestelde signalen op beide ingangen. Als de spanning op de positieve ingang stijgt, dan zal tegelijkertijd de spanning op de negatieve ingang dalen. Het spanningsverschil tussen de ingangen is dan steeds maximaal en zo zal het ook gesteld zijn met de uitgangsspanning.

### Tegenkoppeling

Uiteraard zijn de getekende schakelingen zeer sterke vereenvoudigingen. Als u de op-amp zó gebruikt, dan zal door de grote versterkingsfactor van het IC de uitgang bij het geringste spanningsverschil tussen de ingangen vastlopen tegen een van de voedingsspanningen. Praktische versterkerschakelingen met operationele versterkers zijn alleen mogelijk door het inlassen van tegenkoppelingen. Door weerstanden tussen de uitgang en de negatieve ingang kunt u de A van de op-amp terugbrengen tot bruikbare waarden.

### Het eerste experiment

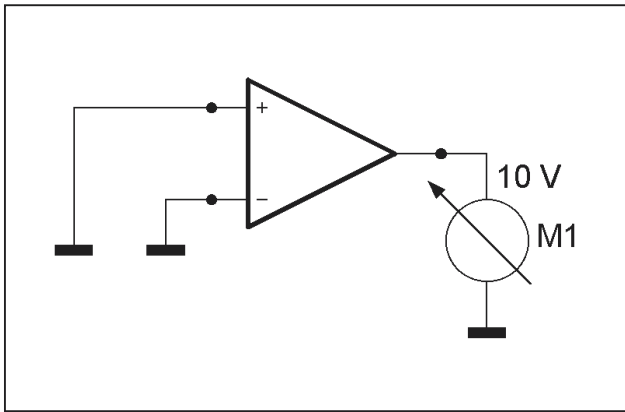
In de vorige paragraaf stelden we dat een op-amp niet versterkt, als beide ingangen dezelfde spanning voeren. Dat kunt u even uitproberen op uw universele op-amp trainer, door bijvoorbeeld beide ingang met de massa te verbinden. Het schema van dit schakelingetje is getekend in figuur 34, de bedrading van het experimenteerprintje volgt uit figuur 35. Tussen de soldeerlipjes A, F, D, H en I soldeert u draadjes, de ingangen 1 en 4 gaan naar de massa-aansluitingen. Een van de drie meters sluit u aan op uitgang 5, de meterschakelaar staat op "10 V".

Als u nu de trainer inschakelt stelt u vast dat de naald van de meter in de hoek vliegt. De uitgangsspanning van de schakeling is niet nul, zoals het zou horen, maar ongeveer +10 V of -8 V. Hoe kan dat?

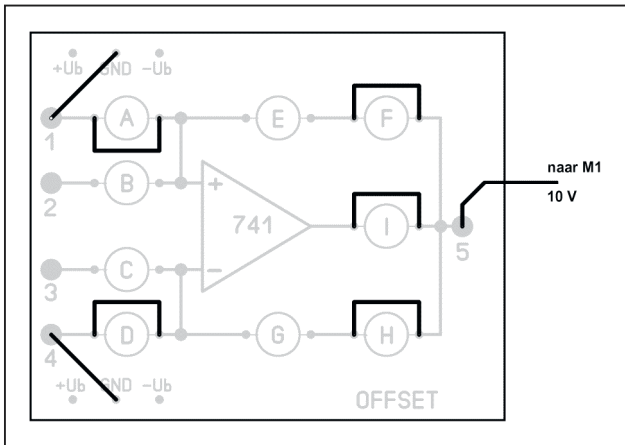
### De offset

Een slechte eigenschap van operationele versterkers speelt u bij dit eerste experiment parten: de offset.





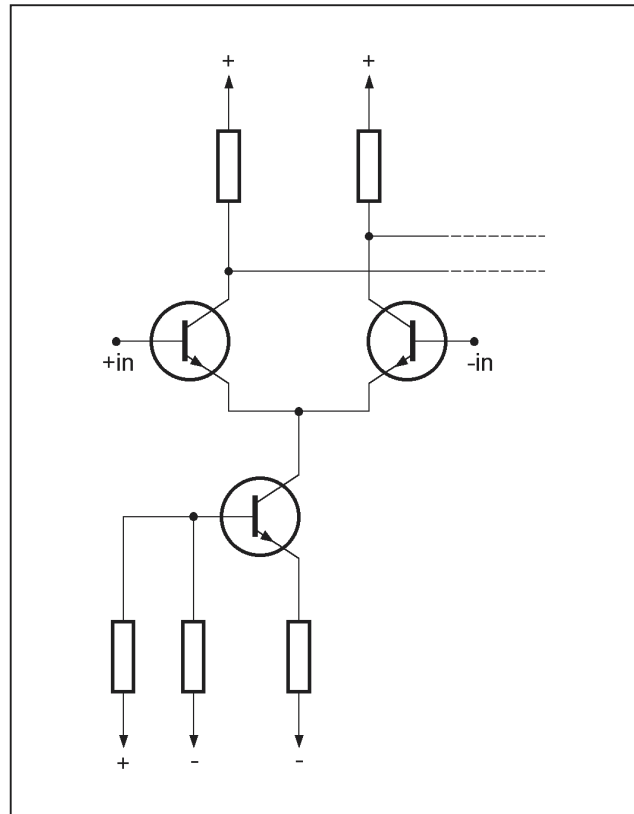
**Figuur 34:** Het eerste experiment, waarmee u kunt onderzoeken of de schakeling inderdaad 0 V aan de uitgang levert als er geen verschilspanning tussen de ingangen staat.



**Figuur 35:** De bedrading op de experimenteerprint voor het eerste experiment.

Kijk even naar figuur 36, een eenvoudige voorstelling van de ingangstrap van een op-amp. Twee transistoren T1 en T2 zijn geschakeld als verschilversterker, dus met gemeenschappelijke emitteraansluiting. De basis van de ene vormt de positieve ingang van de op-amp, de basis van de andere de negatieve ingang. Beide transistoren geleiden, dus tussen de basis en de emitter staat de normale geleidingsspanning  $U_{be}$  van ongeveer 0,7 V.

In theorie zou  $U_{be1}$  gelijk moeten zijn aan  $U_{be2}$ . In de praktijk is dat nooit het geval, want die parameter is afhankelijk van een heleboel factoren, zoals de constructie van het IC, de temperatuur van de omgeving, etc. Dat verschil in  $U_{be}$ 's wordt de offset van de op-amp



**Figuur 36:** Uit dit schema van de ingangstrap van een op-amp volgt de verklaring van het offset-verschijnsel.

genoemd. De twee  $U_{be}$ 's worden door het IC geïnterpreteerd als een deel van het ingangssignaal. Als u beide ingangen aan de massa legt, dan denkt het IC dat de positieve ingang op een spanning staat van  $U_{be1}$  en de negatieve op een spanning van  $U_{be2}$ . Het geringste verschil tussen beide grootheden wordt 200.000 maal versterkt en leidt tot het volledig positief of negatief uitsluiten van de schakeling. Vandaar de +10 V of -8 V aan de uitgang van het IC.

### Offset compensatie

De offset is zeer ongewenst en vandaar dat vrijwel alle op-amp's twee aansluitingen hebben, waarop u een instelpotentiometertje kunt aansluiten en waarmee u die offset kunt compenseren. Op de rand van de experimenteerprint hebben we zo'n offsetcompensatie opgenomen. Draai voorzichtig aan dit potentiometertje. Op een bepaald moment vliegt de naald van de meter van de ene hoek van de schaal maar de andere. Dat punt is de goede instelling van de offsetcompensatie.

Het is het overgangspunt van een positieve offset naar een negatieve. Dat u de uitgang van het IC niet op nul kunt regelen is logisch. Zelfs een rest-offset van een fractie van een mV wordt 200.000 maal versterkt en stuurt de uitgang van de schakeling naar een van de voedingsspanningen.

Als u in de volgende experimenten leert hoe u die grote open-lus versterking kunt temperen, zult u merken dat het compenseren van de offset in de praktijk heel soepel verloopt.

### **Besluit**

Een operationele versterker is een zeer goede versterker. Deze eigenschap heeft wel als nadeel dat u met de “naakte” schakeling niet zo veel kunt doen. In vrijwel alle gevallen zult u door het opnemen van weerstandsnetwerken tussen de in- en uitgangen de op-amp moeten dwingen dát te doen wat u ervan verwacht.

En dat is wat wij in de volgende dertig hoofdstukken gaan doen, zodat u een volleerd op-amp ontwerper wordt!

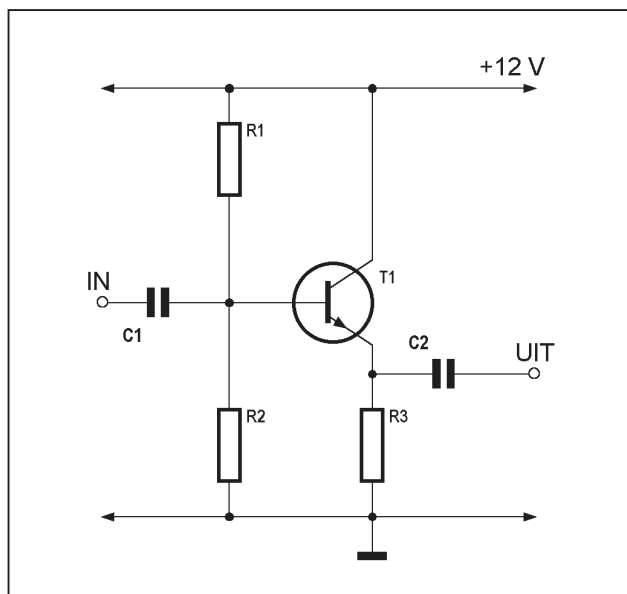


### 3 De op-amp als buffer versterker

#### Inleiding

Buffer versterkers zijn schakelingen, die het aan de ingang aangeboden signaal zo min mogelijk beïnvloeden, maar wel als een soort van impedantietransformator werken. Deingangsimpedantie van een buffer is zeer groot, de uitgangsimpedantie zeer laag. De spanningsversterking is gelijk aan één.

Buffer versterkers gebruikt u waar rechtstreekse koppeling van de ene schakeling aan de andere schakeling problemen kan geven. Het eenvoudigste voorbeeld van een buffer is de emittervolger, zie figuur 37, vaak toegepast om kleine bromgevoelige signalen, zoals de uitgangsspanning van een microfoon, over een lange kabel te transporteren.

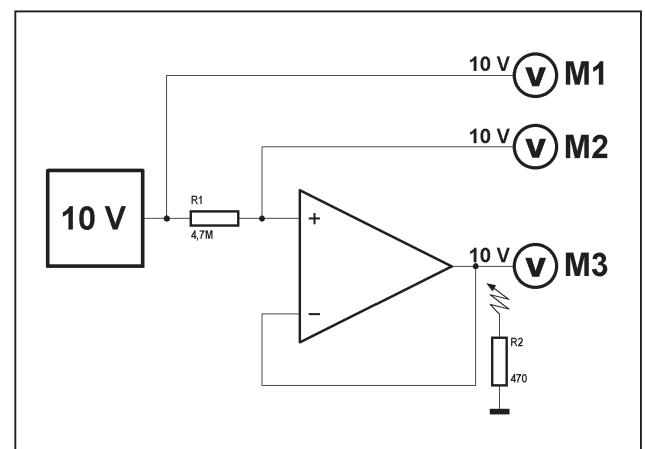


**Figuur 37:** Het eenvoudigste voorbeeld van een buffer versterker is de emittervolger.

#### De op-amp als buffer

De schakeling van figuur 37 kost tóch nog zes kostbare onderdelen. Met een op-amp kunt u veel eenvoudiger een buffer versterker maken, wat vrij logisch is als u zich even de vrij hoge in- en vrij lage uitgangsimpedantie van het IC voor ogen haalt. De fundamen-

tele schakeling van een op-amp buffer is de eenvoud zelf: het te bufferen signaal wordt aan de positieve ingang aangeboden, de negatieve ingang is rechtstreeks gekoppeld met de uitgang. Eén onderdeel, om precies te zijn! In figuur 38 is een testschema getekend, waarmee u de eigenschappen van zo'n buffer kunt opsporen.



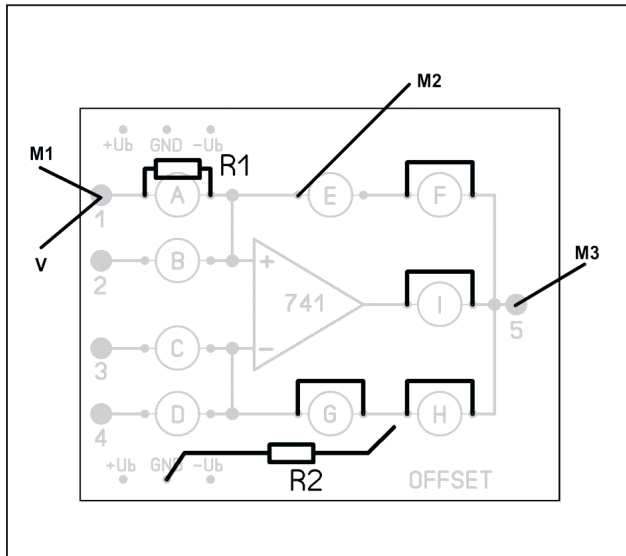
**Figuur 38:** De schakeling waarmee u de eigenschappen van een op-amp buffer versterker kunt onderzoeken.

Aan de ingang sluit u een van de gelijkspanningsuitgangen van uw universele op-amp trainer aan, geschakeld op het  $\pm 10$  V bereik. De drie meetschakelingen staan eveneens op het  $\pm 10$  V bereik. De weerstand R1 van  $4,7\text{ M}\Omega$  soldeert u vast in de schakeling, de weerstand R2 van  $470\text{ }\Omega$  wordt zo in de schakeling opgenomen dat u hem desgewenst even met de uitgang van het IC in contact kunt brengen. De twee weerstanden zijn niet nodig voor de buffer zélf, maar zijn hulpelementen om de drie belangrijke eigenschappen van de schakeling te kunnen meten: de versterkingsfactor, deingangsimpedantie en de uitgangsimpedantie.

#### Ons tweede experiment

Figuur 39 geeft de bedradingsofzet op uw experimenteerprintje. De drie verbindingen





**Figuur 39:** De bedrading voor de buffer versterker op uw experimenteerprintje.

naar de drie meters en de ene verbinding naar de gelijkspanningsbron maakt u natuurlijk met de kabeltjes die u speciaal voor dit doel heeft gemaakt.

### Uw eerste meetresultaten

Bij het inschakelen van de voedingsspanning zult u zien dat alle meters dezelfde spanning aanduiden.

Wat kunt u hieruit afleiden?

- De spanningsversterking  
In de eerste plaats dat de spanningsversterking van de schakeling gelijk is aan één. 2 V aan de ingang geeft 2 V aan de uitgang.
- De ingangsimpedantie  
In de tweede plaats dat de ingangsimpedantie van de schakeling blijkbaar zeer hoog is. De ingang vraagt zo weinig stroom van de ingangsspanning, dat er over de toch zeer grote weerstand R1 geen meetbare spanningsval optreedt. Zou dat wel het geval zijn, dan zou M2 een lagere spanning aangeven dan M1. Uit dat spanningsverschil zouden we de stroom door R1 kunnen berekenen en bijgevolg ook de ingangsimpedantie van de buffer.
- De uitgangsimpedantie  
Stel de ingangsspanning van de schakeling in op +5 V, verbindt het vrije einde van de weerstand R2 even met de uitgang en let op de meter M3. De naald verroert niet.

Hieruit kunnen we besluiten dat de uitgangsweerstand van de buffer erg laag is. Immers, de belasting met een weerstand van  $470\ \Omega$  doet een stroom van ongeveer 10 mA vloeien. Deze stroom komt uit de uitgang van de op-amp en loopt dus ook door de inwendige weerstand van de uitgang van de op-amp. Als deze weerstand bijvoorbeeld  $10\ \Omega$  zou zijn, dan zou er door het aansluiten van de belastingsweerstand een spanningsval van 0,1 V op de uitgang ontstaan, iets dat u zonder meer op M3 ziet. Nu verroert de naald van de meter niet eens, waaruit volgt dat de inwendige weerstand van de buffer erg laag is.

### Besluit

Kortom, een buffer heeft een spanningsversterking van 1, een zeer hoge ingangsimpedantie en een zeer lage uitgangsimpedantie. Theoretisch komt het er op neer dat de waarde van de ingangsimpedantie van de “naakte” op-amp vermenigvuldigd wordt met de versterkingsfactor van de op-amp en de waarde van de uitgangsweerstand van de “naakte” op-amp gedeeld wordt door dezelfde factor.

### Verklaring van de werking

Hoe kunnen we dit gedrag verklaren? Hoe is die ontzettend hoge versterkingsfactor van 200.000 door één simpele doorverbinding tussen de in- en de uitgang teruggebracht tot één? Dat is fysisch het makkelijkst aan te tonen door even te veronderstellen dat de op-amp erg traag werkt, of met ander woorden dat een spanning op de ingang niet dadelijk een spanning op de uitgang tot gevolg heeft. Als u dan opeens een spanning van bijvoorbeeld 1 V op de positieve ingang aansluit, dan zal de uitgang eerst nog even nul blijven. Dat is dan ook de spanning op de negatieve ingang. Er ontstaat dus een spanningsverschil tussen de beide ingangen van niet minder dan 1 V, de op-amp gaat zijn volle 200.000 eenheden versterkingsfactor op dat spanningsverschil loslaten. De uitgangsspanning stijgt erg snel. Deze spanningsstijging vindt u echter dadelijk terug op de negatieve ingang. Het gevolg is dat het span-

ningsverschil tussen de beide ingangen steeds kleiner wordt. Op een bepaald moment is de uitgangsspanning gestegen tot bijna +1 V. Dan ontstaat er een spanningsverschil tussen de positieve en negatieve ingang van een fractie van een volt. Dat onmeetbaar klein spanninkje levert, na versterking met 200.000, een uitgangsspanning op die op een haar na gelijk is aan de spanning op de ingang.

### Niet écht gelijk aan een

Uit de bespreking van de werking van de buffer valt af te leiden, dat de versterking niet echt exact 1 is, maar een haartje minder. Dat zeer kleine verschilspanninkje zorgt immers voor de stabiele toestand van de schakeling. Waarom zegt men dan toch steeds dat een buffer een versterking van 1 heeft? Omdat de afwijking werkelijk verwaarloosbaar is. Officieel is de spanningsversterking van een buffer gelijk aan:

$$A' = A / (1 + A)$$

waarin  $A'$  de versterking van de buffer is en  $A$  de versterking van de op-amp zelf. Vul deze formule maar eens in voor een 741 met zijn  $A$  van 200.000:

$$A' = 200.000 / (1 + 200.000)$$

$$A' = 200.000 / 200.001$$

$$A' = 0,99999999....$$

Een muggenzifter, die daar geen 1 van wil maken!

### Geen spanningsverschil tussen de ingangen

Uit deze bespreking volgt een zeer belangrijke eigenschap van op-amp's:

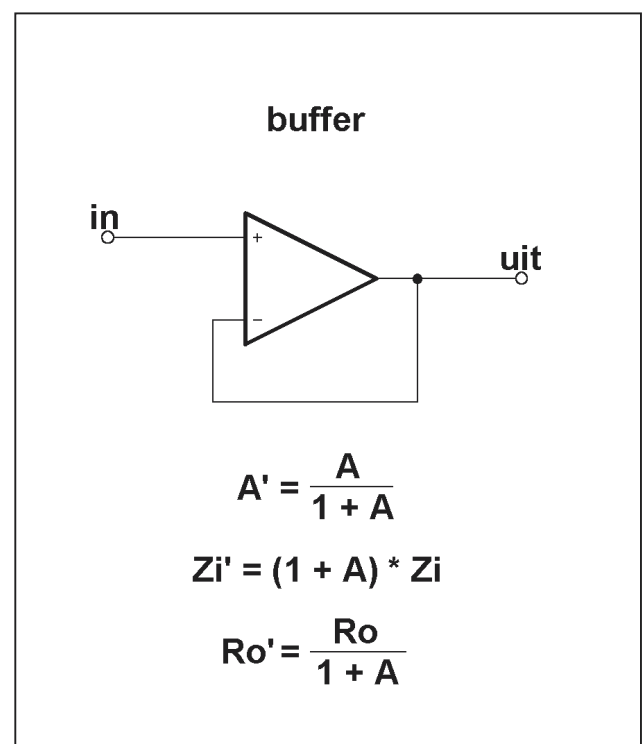
**een schakeling waarin een op-amp zit zal steeds streven naar een minimaal spanningsverschil tussen de twee ingangen van de op-amp.**

Omdat dit spanningsverschil niet eens echt meetbaar is, zegt men dat een op-amp er

steeds voor zorgt dat zijn twee ingangen op dezelfde spanning komen te staan. Alle schakelingen rond op-amp's kunnen met deze eenvoudige regel worden verklaard, let maar op bij de volgende experimenten.

### Samenvatting

In de tabel van figuur 40, tenslotte, zijn alle eigenschappen van een buffer versterker met een op-amp overzichtelijk gegroepeerd. De symbolen met accent duiden op eigenschappen van de totale schakeling, de symbolen zonder accent op eigenschappen van de op-amp zelf.



**Figuur 40:** Samenvatting van de specificaties van een buffer versterker.

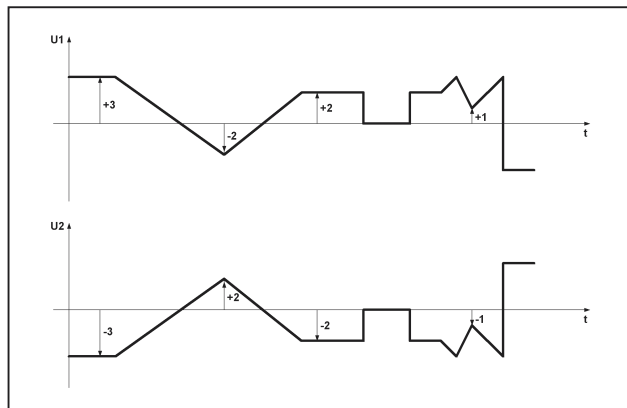


## 4 De op-amp als omkeerversterker

### Inleiding

Vaak komt het voor dat u de absolute grootte van een signaal wilt behouden, maar dat u het signaal moet omkeren. Denk bijvoorbeeld aan een brugversterker, waar u het audiosignaal moet omkeren alvorens het de tweede eindversterker van de brug voedt. De operationele versterker is een ideale omkeerversterker.

Eerste vraag is echter wat bedoeld wordt met “het omgekeerde van een signaal”. Figuur 41 toont een signaal  $U_1$  en het omgekeerde signaal  $U_2$ . De laatste spanning is, absoluut gezien, steeds gelijk aan het origineel. Is  $U_1 + 3\text{ V}$ , dan is  $U_2 -3\text{ V}$  en zo verder. Niet de grootte van het signaal verandert, maar wel de polariteit. Het omgekeerde of inverse van een signaal ontstaat, als u dit signaal spiegelt rond de horizontale nul-as.

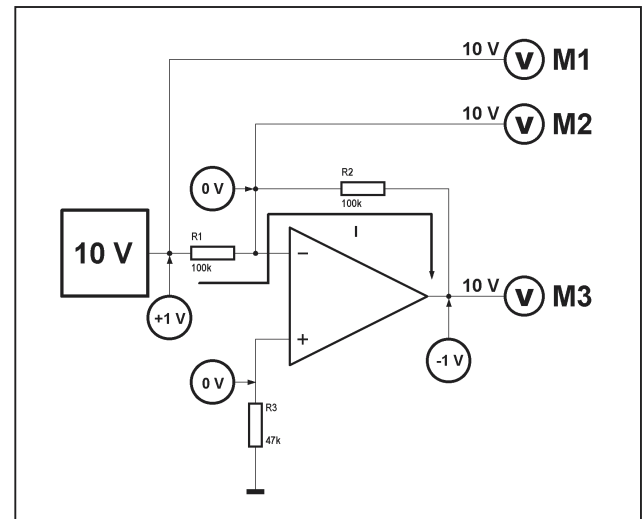


**Figuur 41:** Uit deze grafiek volgt duidelijk de definitie van het begrip “omkeren van een spanning”.

### De omkeerversterker met een op-amp

Met transistoren is de omkeerbewerking een hele klus, een op-amp vraagt slechts drie weerstandjes. Het basisschema van de analoge inverter is getekend in figuur 42. Het signaal wordt via een weerstand  $R_1$  aangesloten op de negatieve ingang, tussen deze ingang en de uitgang staat een even grote weerstand  $R_2$ . De positieve ingang van de

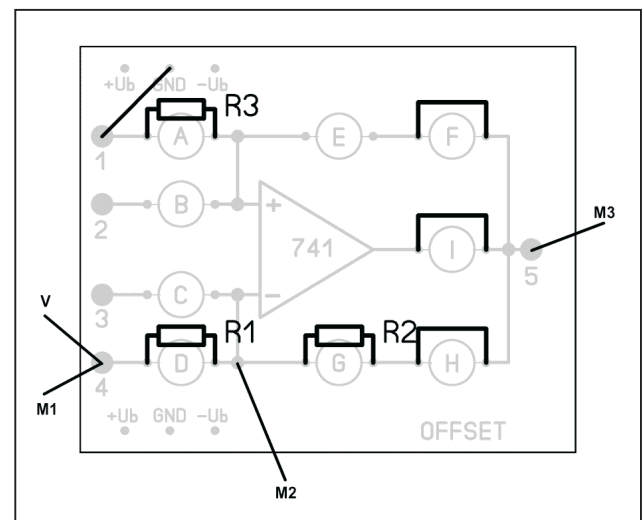
op-amp ligt aan de massa geschakeld via een weerstand  $R_3$ , gelijk aan de helft van de eerder genoemde componenten.



**Figuur 42:** Het basisschema van de omkeerversterker met een op-amp.

### Experiment 3

U kunt de schakeling snel op de experimenteerprint opbouwen en verbinden met de op-amp trainer, zie figuur 43, waarbij u de drie meters en de gelijkspanningsgenerator op het bereik “10 V” schakelt.



**Figuur 43:** De omkeerversterker op uw experimenteerprint.



De positieve ingang van de op-amp ligt op massapotentiaal. Het wekt dan ook geen verbazing dat u op meter M2, verbonden met de positieve ingang, steeds 0 V afleest.

Zoals geschreven bij het vorige experiment streeft een op-amp naar minimaal spanningsverschil tussen zijn beide ingangen. Als de positieve ingang op 0 V staat, dan zal de schakeling er naar streven ook de negatieve ingang op 0 V te zetten.

De inverterende werking wordt bewezen door aan de ingang een spanning van bijvoorbeeld +5 V aan te leggen (M1) en de spanning op de uitgang af te lezen (M3). Deze bedraagt -5 V.

### Verklaring van de schakeling

De ingangsimpedantie van de op-amp is zeer groot, vergeleken met de waarde van de weerstanden R1 en R2. De weerstanden R1 en R2 staan in serie tussen de ingang en de uitgang van de schakeling. Door deze serieschakeling loopt een stroom  $I$ , waarvan de grootte wordt bepaald door de waarde van de ingangsspanning en de grootte van de twee weerstanden. De stroom die via de negatieve ingang in de op-amp vloeit is verwaarloosbaar klein, vanwege de eerder genoemde hoge  $Z_i$ . Omdat R1 en R2 even groot zijn, zullen de spanningsvallen over beide weerstanden even groot zijn. Dat kan niet anders, want de wet van ohm zegt dat de spanning over een weerstand gelijk is aan de vermenigvuldiging van stroom en weerstand. Beide grootheden zijn voor beide weerstanden aan elkaar gelijk. Over R1 valt de ingangsspanning. De negatieve ingang staat immers op massapotentiaal. Als over R1 een spanning valt, gelijk aan de ingangsspanning, dan moet u per definitie over R2 dezelfde spanningsval meten.

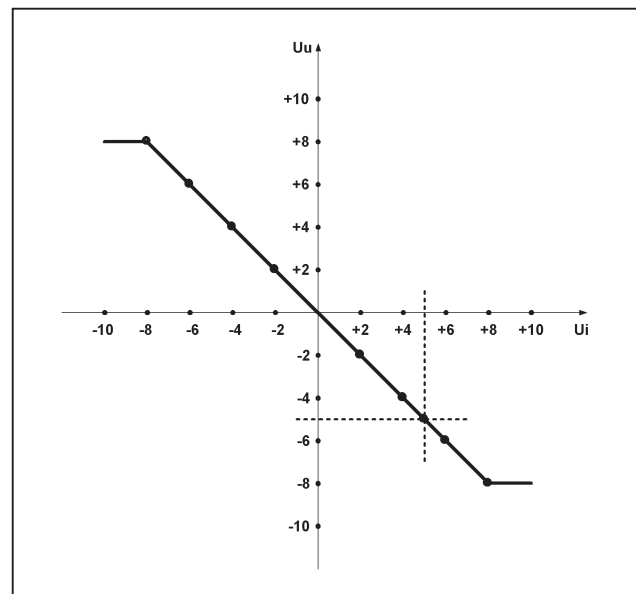
Een voorbeeldje.

Stel de ingangsspanning gelijk aan +1 V. Deze spanning valt over R1, met de in figuur 42 getekende polariteit: linker aansluiting positief ten opzichte van rechter aansluiting. Omdat R2 door dezelfde stroom in dezelfde richting wordt doorlopen, moet de spanning over deze weerstand dezelfde polariteit hebben. Dus: linker aansluiting positief ten op-

zichte van rechter aansluiting. Nu ligt de linker aansluiting van de weerstand aan de massa. Aan het gestelde wordt alleen voldaan, als de rechter aansluiting op -1 V staat. Hetgeen precies het omgekeerde of inverse van de ingangsspanning is.

### De transferkarakteristiek

Dit experiment is ideaal om vertrouwd te worden met het begrip "transferkarakteristiek". Dit is een grafiekje dat het verband aangeeft tussen de in- en uitgangsspanning van een schakeling. Figuur 44 geeft u de transferkarakteristiek van de omkeerversterker. Op de horizontale as worden de aan de ingang aangelegde spanningen weergegeven, de verticale as geeft de spanningen op de uitgang.



**Figuur 44:** De transferkarakteristiek van de schakeling.

### Het uitsturingsbereik van een schakeling

Als u dat doet voor de inverter, zult u vaststellen dat er twee knikken in de karakteristiek ontstaan. Als u de ingangsspanning namelijk groter maken dan ongeveer +8 V, dan zal de uitgangsspanning op -8 V blijven hangen. Eenzelfde verschijnsel doet zich voor bij een te grote negatieve ingang. Op deze manier kunt u het uitsturingsbereik van de schakeling meten. Zolang de karakteristiek recht is, is er niets aan de hand. De uitgang is het inverse van de ingang. Voor te grote positieve

of negatieve ingangsspanningen gaat de inverterende werking verloren. Men zegt dat de uitgangsspanning van de op-amp vastloopt tegen de voedingsspanning. Het is logisch dat de op-amp geen grotere spanningen kan opwekken dan de waarde van zijn voedingsspanningen.

### Opmerking

Bij de 741-print worden de voedingsspanningen door middel van zenerdioden begrensd op  $\pm 10$  V. Hieruit blijkt duidelijk dat het uitsturingsbereik van een op-amp lager is dan de totale voedingsspanning. Er gaan een aantal volt verloren in het interne van het IC.

### Samenvatting

De tabel van figuur 45 geeft een overzicht van de eigenschappen van de inverter. De versterking van de schakeling  $A'$  is gelijk aan -1. Het minteken duidt op de inverterende werking. Belangrijk is de eis dat  $R_1$  gelijk is aan  $R_2$ . Iedere afwijking zorgt voor een niet precies gelijk zijn van in- en uitgangsspanning (in absolute waarde, uiteraard).

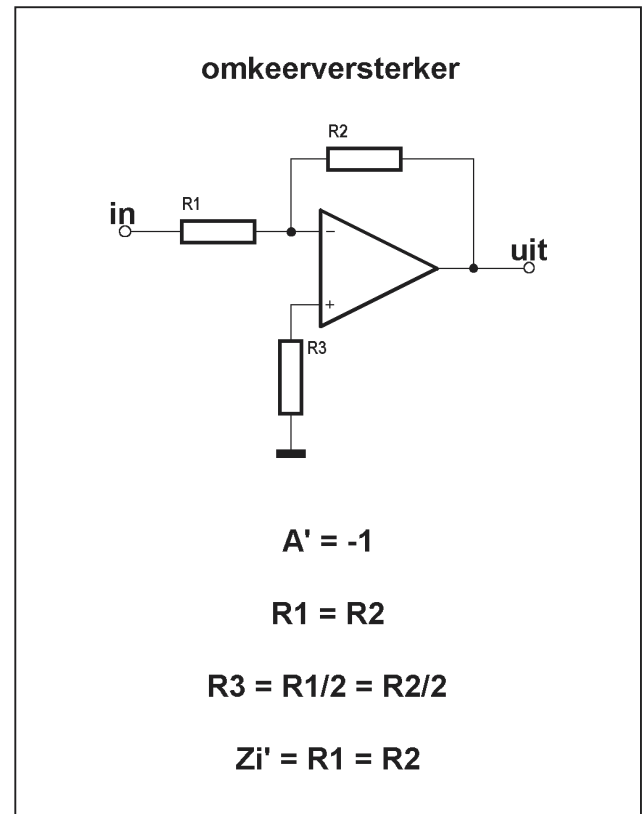
De waarde van  $R_3$  is niet kritisch, meestal kiest men deze weerstand gelijk aan de helft van  $R_1$ . Uit het feit dat de negatieve ingang aan de massa ligt volgt dat de ingangsimpedantie van de schakeling volledig wordt bepaald door de waarde van  $R_1$ . Deze weerstand staat immers geschakeld tussen de ingang en de op massapotentiaal liggende negatieve ingang. De  $R_i$  van de op-amp speelt dus nu niet mee!

### Zélf meten!

Dit experiment is een ideale basis om u vertrouwd te maken met het zélf tekenen van karakteristieken. In dit geval gaat het natuurlijk over de in figuur 44 voorgestelde transferkarakteristiek. We hebben op de laatste pagina van dit hoofdstuk een lege grafiek afgedrukt, waarin u uw meetwaarden kunt invullen.

De procedure is eenvoudig.

Zet op de ingang een bepaalde spanning, bijvoorbeeld +5 V. Meet dan de spanning op de uitgang. Deze zal -5 V bedragen. Beide waarden worden op de respectievelijke as-



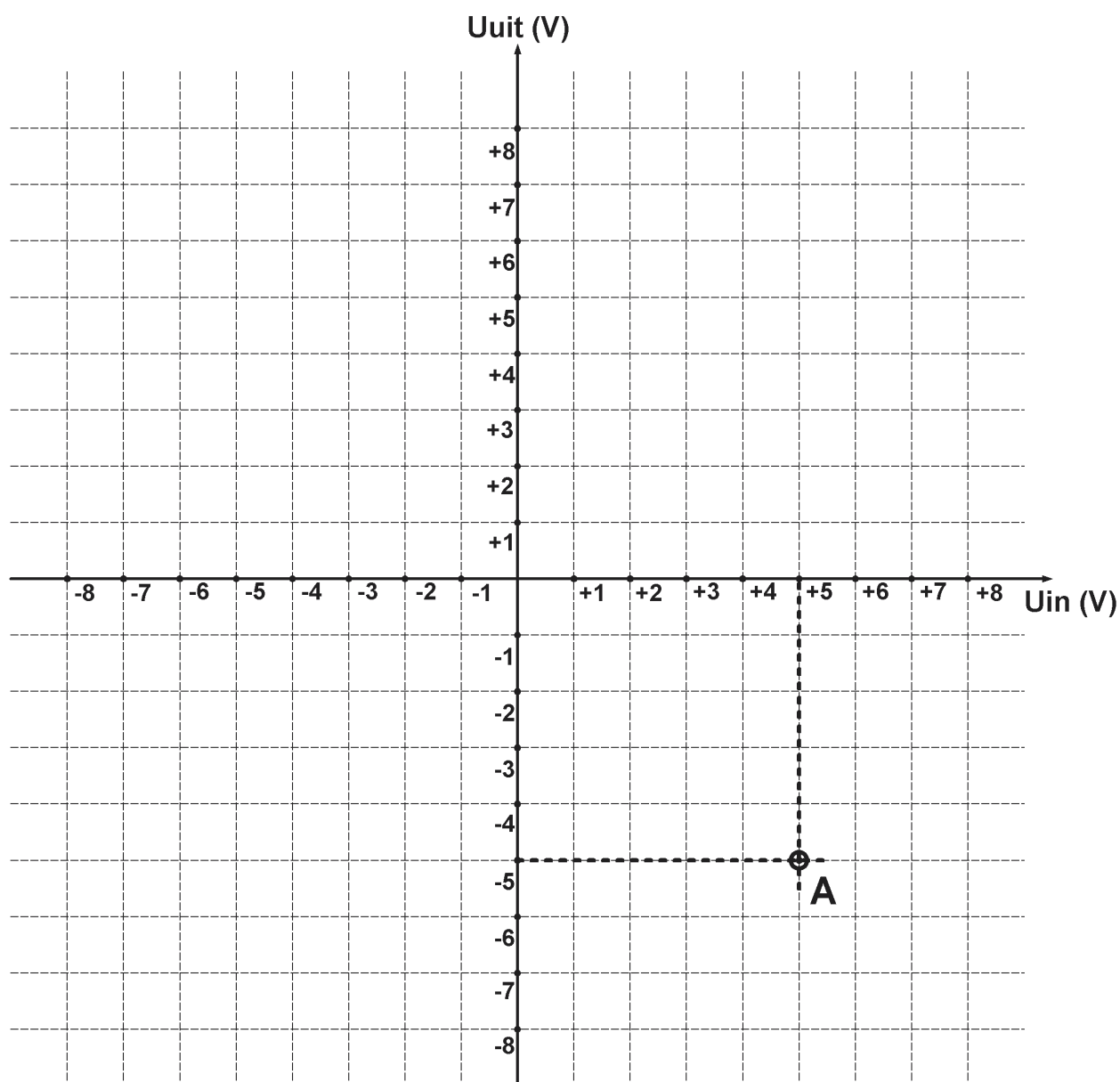
**Figuur 45:** Samenvatting van de specificaties van de omkeerversterker met op-amp.

sen aangegeven en twee hulplijntjes (gestipeld weergegeven) worden getrokken. Het snijpunt van deze hulplijntjes bepaalt één punt A van de karakteristiek. Dit ene voorbeeld hebben wij op de grafiek ingevuld. Als u deze procedure voor verschillende ingangsspanningen herhaalt, bijvoorbeeld om de 1 V, ontstaat een rij van puntjes, die u kunt doorverbinden. Het resultaat is een kromme (in dit geval een rechte lijn): de transferkarakteristiek.

### Interpoleren

Het verbinden van de punten door middel van een lijn of een curve noemt men **interpoleren** van de meetgegevens. Men gaat er van uit dat de schakeling, tussen de door u gemeten punten, hetzelfde gedrag zal vertonen als op uw meetpunten. In de meeste gevallen kunt u, dank zij dit interpoleren, een volledig grafisch verband tussen in- en uitgang opstellen door maximaal tien punten van de grafiek écht te meten.

## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!



## 5 De op-amp als niet-inverterende versterker

### Inleiding

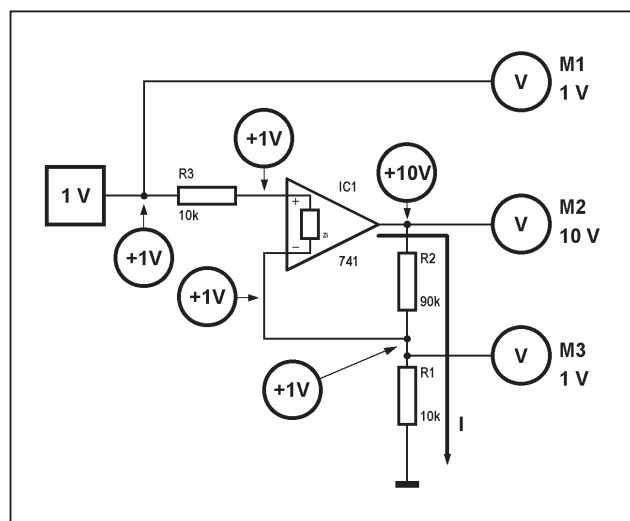
Tot nu toe heeft u de op-amp gebruikt in schakelingen waar er van echte versterking geen sprake was. De volgende experimenten behandelen een paar versterkerschakelingen, ieder geschikt voor specifieke toepassingen. Als u prijs stelt op een hoge ingangsimpedantie, is de in dit experiment behandelde niet-inverterende versterker ideaal.

### Niet-inverterende werking

Zoals de naam reeds zegt, werkt de versterker niet-inverterend. Dat wil zeggen dat de uitgangsspanning in fase is met de ingangsspanning. Een spanningsstijging aan de ingang heeft een spanningsstijging aan de uitgang tot gevolg.

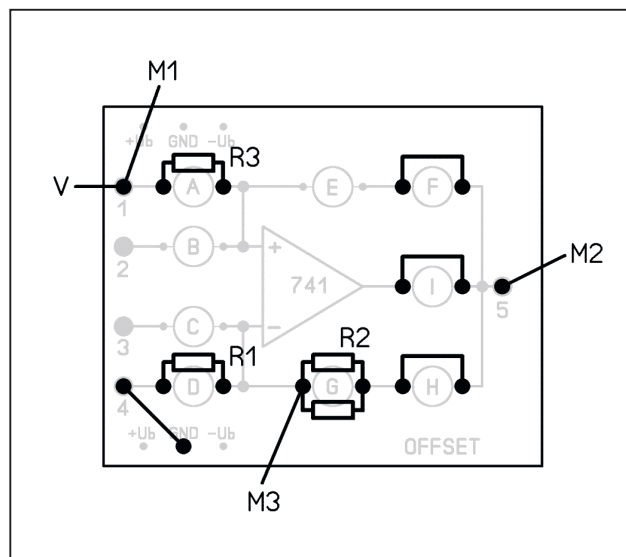
### Het basisschema

Het basisschema van de schakeling is getekend in figuur 46.



**Figuur 46:** Het basisschema van de niet-inverterende versterker.

De ingangsspanning wordt via een weerstand R3 aangesloten op de positieve ingang van de versterker. Tussen de uitgang en de massa staat een seriekring van twee weerstanden R1 en R2.



**Figuur 47:** Het schema uitgewerkt op uw experimenteerprint.

De negatieve ingang is aangesloten op het knooppunt van beide weerstanden. Als voorbeeld construeren we een maal tien versterker. De uitgangsspanning is tien keer groter dan de ingangsspanning. Zoals later zal blijken, wordt de versterkingsfactor van tien bepaald door de onderlinge verhouding van R1 en R2. Het is daarom zeer belangrijk dat R2 exact negen maal groter is dan R1. Als u R1 gelijk aan 10 kΩ kiest, moet R2 gelijk zijn aan 90 kΩ. Dat is geen standaardwaarde, maar twee parallel geschakelde weerstanden van 180 kΩ leveren de gewenste waarde op. Vandaar dat in het bedradingsschema van figuur 47 op plaats G twee van die weerstanden zitten.

### Aan de slag!

Bouw de schakeling volgens figuur 47 op één van uw experimenteerprinten. Aan de ingang sluit u een van de instelbare gelijkspanningen V aan, de punten M1, M2 en M3 gaan naar de drie meetapparaatjes op uw trainer. Als u de analoge trainer inschakelt, zult u vaststellen dat de uitgangsspanning steeds



een factor tien groter is dan de ingangsspanning. Het is dus duidelijk dat u de ingangsspanning moet beperken tot het gebied van  $\pm 1$  V. Voert u grotere spanningen toe, dan zal de uitgang van de op-amp vastlopen tegen een van de voedingsspanningen.

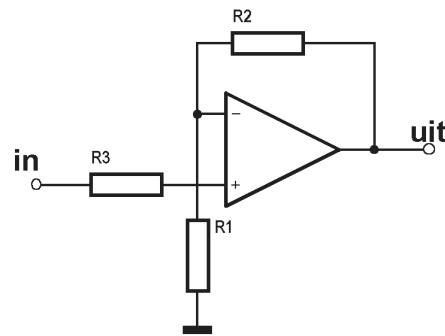
### Hoe werkt deze schakeling?

De op-amp stelt zijn uitgangsspanning zó in dat er geen spanningsverschil bestaat tussen de beide ingangen. Stel dat u aan de ingang een spanning van +1 V aanbiedt. Deze spanning belandt via weerstand R3 op de positieve ingang. Deze weerstand is erg klein, vergeleken met de grote inwendige weerstand van de op-amp. U kunt dus aannemen dat deze spanning onverzwakt op de positieve ingang van de op-amp terecht komt. De schakeling zal er nu voor zorgen dat ook de negatieve ingang op een spanning van +1 V komt te staan. Deze spanning staat natuurlijk ook op het knooppunt van de spanningsdeler R1-R2. Door de twee weerstanden van de deler loopt één stroom I. De belasting van de negatieve ingang kunnen we verwaarlozen. Als R1 en R2 door dezelfde stroom worden doorlopen, verhouden de spanningsvallen over beide componenten zich zoals hun onderlinge weerstandsverhouding. R2 is negen maal R1, de spanningsval over R2 zal dus ook negen maal groter zijn dan de spanningsval over R1. Deze laatste waarde is 1 V, over R2 meet u dus 9 V. De spanningen over R1 en R2 staan in serie, met dezelfde polariteit. De uitgang van de schakeling staat dus op een spanning van 1 V + 9 V = 10 V. De schakeling heeft de ingangsspanning exact 10 maal versterkt.

### Instellen van de versterking

De spanningsversterking wordt bepaald door de verhouding tussen R1 en R2. Als u voor R1 een weerstand van 1 k $\Omega$  kiest en voor R2 een weerstand van 99 k $\Omega$ , dan zal de schakeling honderd maal versterken. Met deze schakeling zijn dus erg grote versterkingsfactoren mogelijk. De waarde van R3 is niet zo kritisch: meestal kiest men een waarde die ongeveer gelijk is aan de parallel schakeling van R1 en R2.

### niet-inverterende versterker



$$A' = \frac{R1 + R2}{R1}$$

$$R3 = \frac{R1 * R2}{R1 + R2}$$

$$Zi' = Zi (1 + A * \frac{R1}{R1 + R2})$$

**Figuur 48:** Samenvatting van de specificaties van de niet-inverterende versterker.

### Ingangsimpedantie

De ingangsimpedantie van de versterker is zeer hoog. Omdat de spanning op de negatieve ingang de waarde van de ingangsspanning volgt, staat er over de serieschakeling van R3 en de Zi van de op-amp geen spanning. Er vloeit dus ook geen stroom door dit onderdeel, de ingang wordt nauwelijks belast.

### De invloed van de offset

Met deze schakeling kunt u de invloed van de offset duidelijk maken. Sluit de ingang van de versterker aan op de massa. Verhoog de versterkingsfactor van de schakeling, door R1 te verlagen tot 1 k $\Omega$ . In principe moet u nu op de uitgang ook nul volt meten. Waarschijnlijk meet u een spanning van enige honderden millivolt positief of negatief. Dit wordt veroorzaakt door de reeds in het eerste experiment genoemde offset van de op-amp. Verdraai de compensatiepotentiometer aan de rand van de experimenteerprint. U kunt daarmee de offset compenseren, zodat de uitgang nul volt wordt bij nul volt op de in-

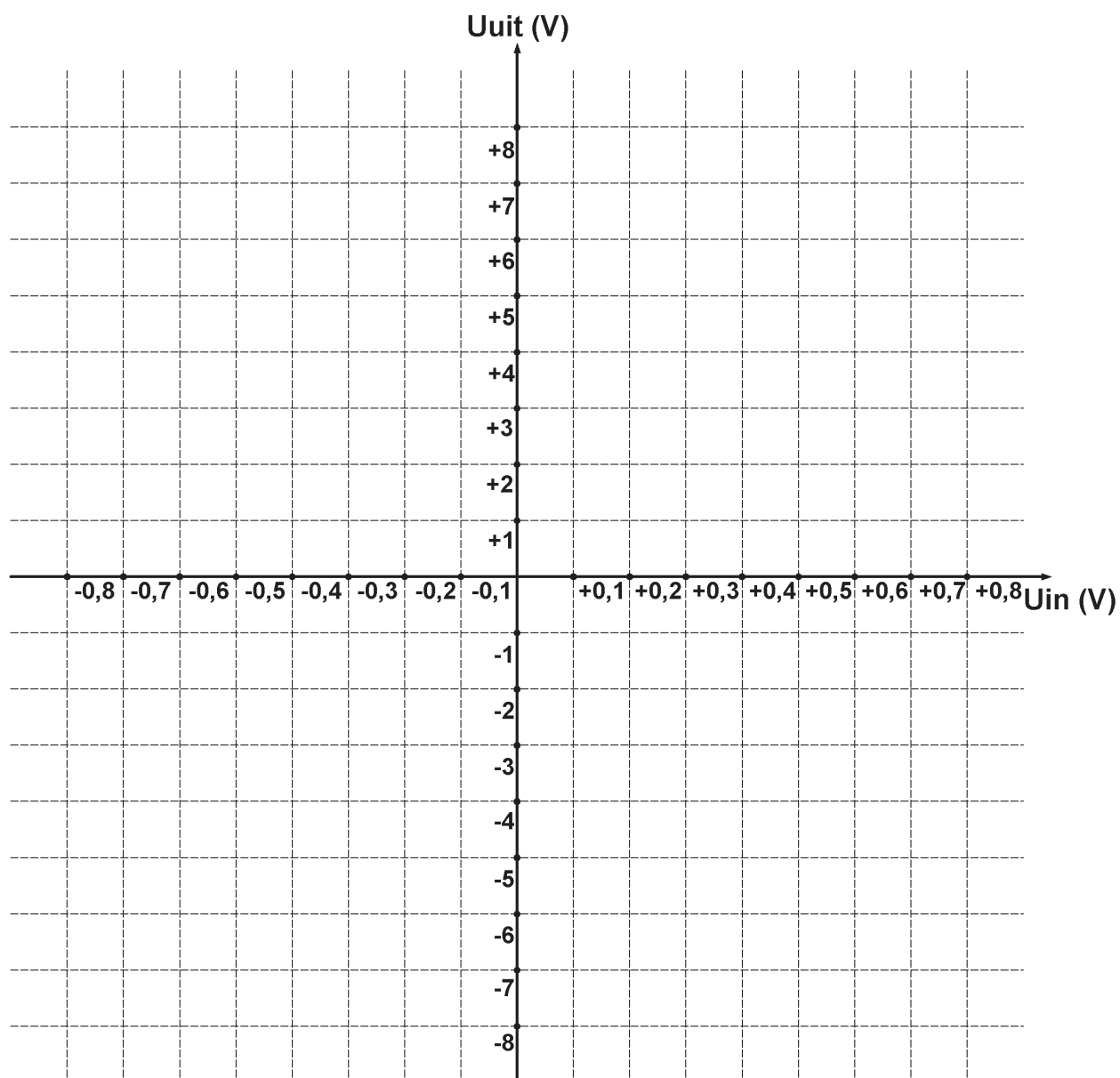
gang. Het zal duidelijk zijn dat de invloed van de offset toeneemt als u de schakeling meer laat versterken. De offset introduceert immers een kleine verschilspanning tussen beide ingangen en deze verschilspanning wordt versterkt met de door R1 en R2 bepaalde versterkingsfactor. Een offsetspanning van 1 mV levert bij een  $\times 100$  versterker reeds een fout op de uitgang van 0,1 V! Bij schakelingen met grote versterkingsfactoren is het dus absoluut noodzakelijk de offset te compenseren.

**Samenvatting**

Zoals gebruikelijk geeft de laatste figuur, in dit geval figuur 48, een overzicht van de eigenschappen van deze schakeling.

**Zélf meten**

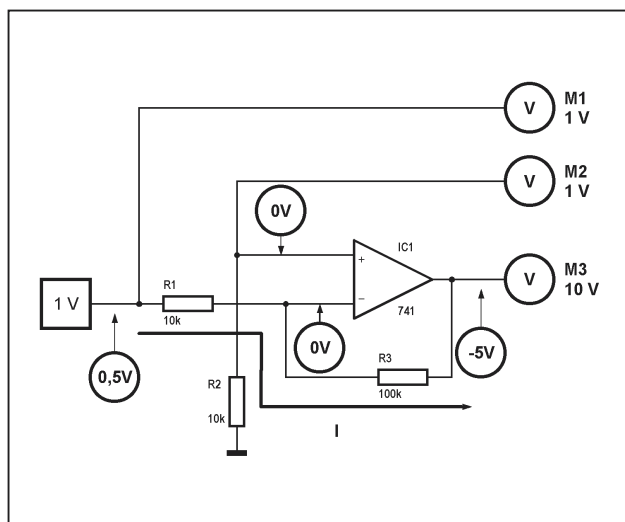
We publiceren op de laatste pagina weer een lege grafiek waarin de resultaten van uw metingen kunt invullen. Vanwege de versterking hebben we het bereik van de ingangsspanning verkleind van -1 V tot +1 V.

**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**

## 6 De op-amp als inverterende versterker

### Inleiding

De inverterende versterker is niet beroemd vanwege zijn hoge ingangsimpedantie, zoals zijn soortgenoot de niet-inverterende versterker, maar vormt wél de basis van allerlei soorten mengversterkers. Vandaar dat een nadere kennismaking met deze schakeling op haar plaats is. Het principeschema van de inverterende versterker is getekend in figuur 49.

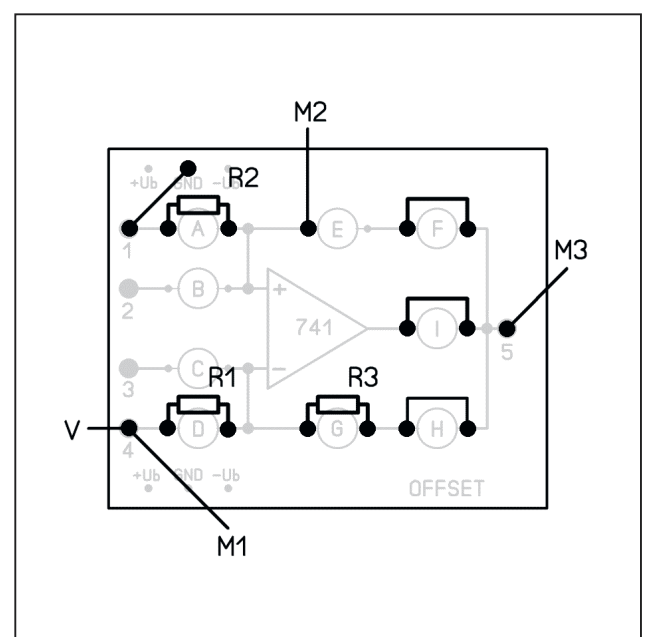


**Figuur 49:** Het principeschema van de inverterende versterker.

De ingangsspanning wordt aangeboden aan de negatieve ingang via een weerstand R1. Tussen deze ingang en de uitgang staat een terugkoppelweerstand R3. De positieve ingang van de operationele versterker wordt met de massa verbonden via weerstand R2. De ingetekende weerstandswaarden leveren een  $\times(-10)$ -versterker op. Het minteken duidt op de inverterende werking van de schakeling: als de ingangsspanning positief is, dan zal de uitgang negatief zijn. Het verschil tussen de absolute waarde van in- en uitgang wordt bepaald door de versterkingsfactor, in het voorbeeld dus 10. Een spanning van +0,5 V aan de ingang resulteert in een spanning van -5 V aan de uitgang.

### De schakeling op de trainer

Bouw de schakeling op volgens figuur 50, sluit de ingang 4 aan op een van de gelijkspanningsbronnen van de trainer (ingesteld op +0,5 V) en de getekende punten op de drie metertjes. Als u het apparaat inschakelt zal M3 inderdaad -5 V gaan aanwijzen.



**Figuur 50:** De inverterende versterker op een van uw experimenteerprintjes.

### De werking van de schakeling

De werking van de schakeling is, zoals steeds, te verklaren uit het feit dat de op-amp het spanningsverschil tussen beide ingangen tot nul regelt. De positieve ingang staat op nul volt, deze ingang ligt immers via R2 aan de massa. De spanning op de negatieve ingang zal dus ook nul zijn. Over weerstand R1 staat bijgevolg een spanning van 0,5 V en wel zo dat de linker aansluiting positief is ten opzichte van de rechter. De stroom, die als gevolg van deze spanningsval door R1 loopt, kan geen andere kant op dan door R3. De ingangsimpedantie van de op-amp is, zoals diverse malen gemeld, bijzonder hoog en vormt geen belasting voor de relatief laag-



ohmige weerstandsdeler R1/R3. Als twee weerstanden door een en dezelfde stroom worden doorlopen, dan verhouden de spanningsvallen over de onderdelen zich zoals hun waarden. R3 is tien maal groter dan R1, dus zal de spanningsval over de eerstgenoemde weerstand ook tien maal groter zijn dan over R1. Over R1 valt 0,5 V, bijgevolg kunt u over R3 een spanning van 5 V meten. Belangrijk is de polariteit van deze spanning. Omdat de stroom I beide weerstanden in dezelfde richting doorloopt, zal ook de polariteit van beide spanningsvallen identiek zijn. De linker aansluiting van R3 is dus positief ten opzichte van de rechter. Omdat de linker aansluiting van R3 op 0 V staat, moet de rechter dus wel op een spanning van -5 V staan.

### Samenvatting

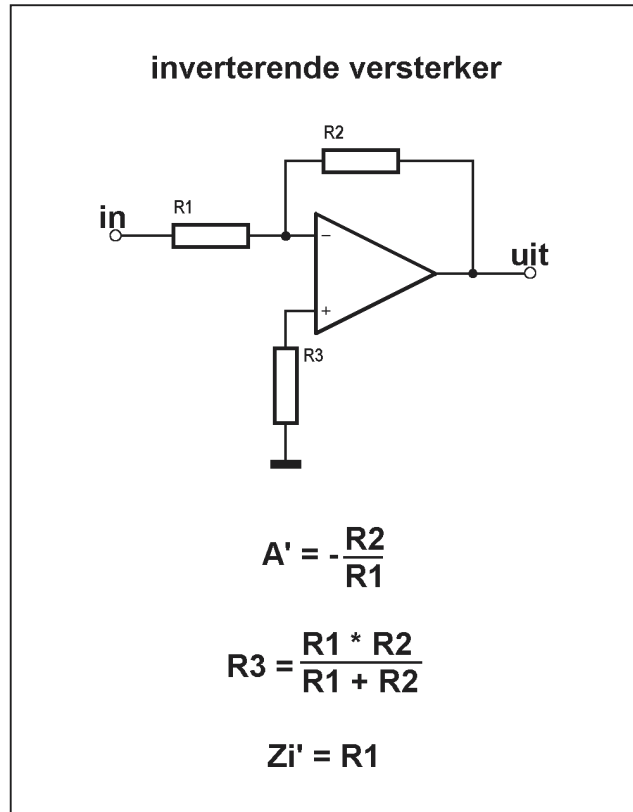
Zoals gebruikelijk zijn in figuur 51 de belangrijkste eigenschappen van de inverterende versterker samengevat.

De versterkingsfactor wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R1. Voor R3 wordt weer de vervangingsweerstand van de parallel schakeling van R1 en R2 gekozen. Deingangsimpedantie Zi' wordt volledig bepaald door de waarde van de weerstand R1.

Vanwege deze laatste eigenschap is de inverterende versterker een ideale schakeling om een trap te ontwerpen die een zeer goed bepaaldeingangsimpedantie moet hebben. Sommige spanningsgevers (microfoons!) eisen een bepaalde afsluitimpedantie, bijvoorbeeld 47 kΩ. Met een inverterende versterker kunt u niet alleen het signaal van de spanningsgever versterken, maar er meteen voor zorgen dat het onderdeel met een correcte weerstand wordt afgesloten. Het komt er op aan de waarde van R1 gelijk te maken aan de voorgeschreven afsluitimpedantie.

### Zélf aan de slag

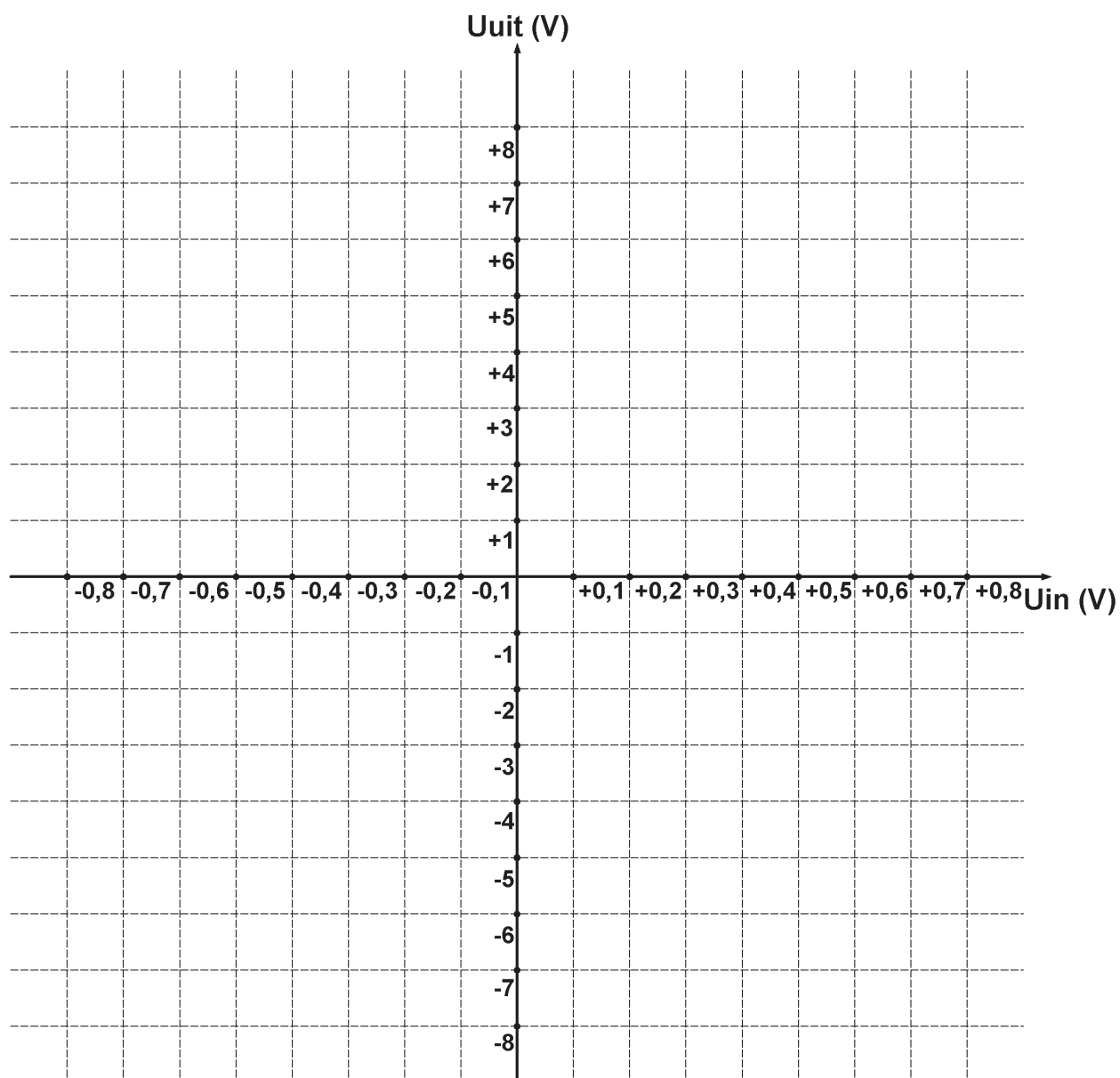
Ook de inverterende versterker is een ideale schakeling om met grafieken te leren werken. In de lege grafiek op de laatste pagina van dit hoofdstuk kunt u weer uw meetresultaten invullen. Leg aan de ingang spanningen aan tussen -0,8 V en +0,8 V in stapjes



**Figuur 51:** Samenvatting van de belangrijkste specificaties van de inverterende versterker.

van 0,1 V. Lees de uitgangsspanningen af en zet de elf gemeten U<sub>uit</sub> = f(U<sub>in</sub>) meetparen uit in de grafiek. U ziet een keurig rechte lijn ontstaan, zoals u ook wel verwacht had.



**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**

## 7 De op-amp als mengversterker

### Inleiding

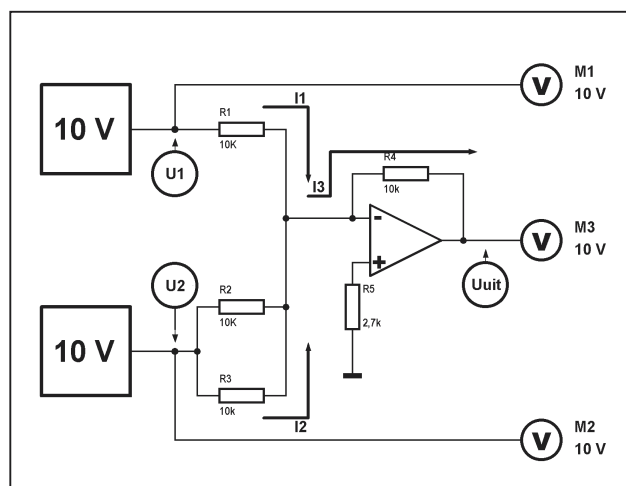
Mengschakelingen zult u vaak toepassen als u zélf schakelingen gaat ontwikkelen. Denk maar aan mixers voor geluidsstudio's, eenvoudige mengertjes voor de geluidshobbyist en allerlei geluidseffectschakelingen (echo, nagalm, vierkanaals, basisbreedteregeling, ruisonderdrukkers) waar steeds een mengschakeling een fundamenteel onderdeel van de elektronica vormt.

De in het vorig experiment beschreven inverterende versterker vormt de basis van iedere (goede) mengversterker. Men noemt hem dan actieve menger omdat er een actief element, in dit geval een operationele versterker, bij betrokken is. Dit in tegenstelling tot passieve mengers, die alleen met weerstanden werken. Op de voor- en nadelen van beide schakelingen komen we in de loop van dit verhaal terug.

### Een tweekanaals menger

Eerst maar eens naar de experimenten, waarbij het schema van figuur 52 en de opstelling van figuur 53 als basis dienen. Dit schema vormt een tweekanaals menger, de spanningen U1 en U2 verschijnen gemengd op de uitgang. U herkent zeer duidelijk de basisopzet van de inverterende versterker. De twee ingangsspanningen sturen ieder via een eigen weerstand de inverterende ingang van de op-amp. Om het wat spannender te maken sluiten we U2 aan via een parallel schakeling van twee weerstanden. De weerstandswaarde tussen ingang 2 en de op-amp is nu gelijk aan de helft van de weerstandswaarde tussen ingang 1 en inverterende ingang. We stellen U1 en U2 in op 0 V en constateren dat ook de uitgang op 0 V staat. Voer via ingang U1 een spanning toe van +2 V. Op de uitgang lezen we een spanning van -2 V af. Deze spanningsverdeling voldoet aan de werking van de inverterende versterker. De weerstanden R1 en R4 zijn aan

elkaar gelijk en als we ingang 2 even buiten beschouwing laten, dan voldoet de schakeling met alleen R1 en R4 aan het basisschema van de inverterende versterker. R1 is bovendien gelijk aan R4, dus de trap werkt als inverterende  $x(-1)$ -versterker. Hetzelfde verhaal geldt als u U1 gelijk aan nul maakt en een spanning aanbiedt aan de tweede ingang. Maar omdat R2 en R3 parallel staan, voldoet de trap aan het schema van een  $x(-2)$ -versterker. Vandaar zult u -4 V op de uitgang meten, als u +2 V op de ingang aanlegt.

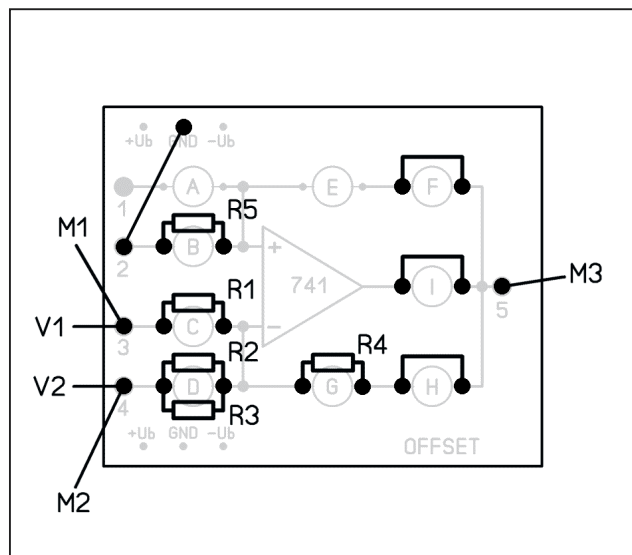


**Figuur 52:** Het schema van een tweekanaals menger.

### We gaan écht mengen

Wat nu, als u op beide ingangen van nul afwijkende spanningen zet? De twee afzonderlijke inverterende versterkers werken dan samen en het gevolg is dat de uitgangsspanning gelijk wordt aan de algebraïsche som van beide deeluutgangssignalen. In de tabel van figuur 54 zijn enige voorbeelden gegeven. Stel U1 en U2 in op +1 V. De verschilversterker met alleen ingang 1 zou een spanning van -1 V aan de uitgang leveren. Zijn soortgenoot met alleen U2 zou, werkend als  $x(-2)$ -versterker, een uitgangsspanning van -2 V opwekken. De uitgangsspanning van de





**Figuur 53:** De mengop uw experimenteerprint.

totale schakeling is gelijk aan de som, dus -3 V. Een en ander is ook meer theoretisch te verklaren. De wet van Kirchhoff stelt dat stroom I3 gelijk is aan de som van I1 en I2. Met dit gegeven als uitgangspunt en de wet van Ohm als hulp, komt u er vrij snel achter dat voor de uitgangsspanning geldt:

$$U_{uit} = -(U_1 + 2 * U_2)$$

### Besluit

Aan de uitgang van de menger verschijnt een spanning, die gelijk is aan het inverse van de som van de ingangsspanningen, ieder vermenigvuldigd met de eigen specifieke versterkingsfactor. Deze factor is afhankelijk van de verhouding R4 tot de weerstand tussen de negatieve ingang van de op-amp en de ingang, waarover u het heeft.

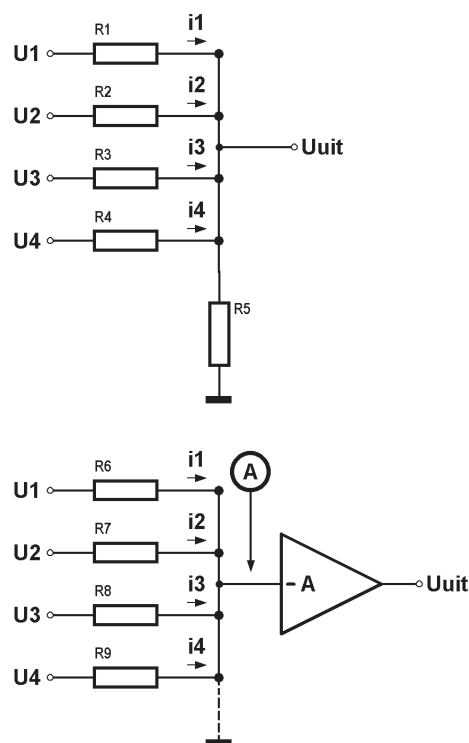
### Actieve contra passieve menger

Wat is het grote voordeel van deze mengversterker boven de reeds in de inleiding genoemde resistieve menger?

Figuur 55 vergelijkt de basisschema's. Boven de resistieve passieve menger, onder de actieve menger met operationele versterker. In het eerste geval ontstaat het mengeffect door de spanningsvallen, die de diverse ingangsstromen opwekken over de mengweerstand R5. In principe gaat dit prima, maar het nadeel is dat alle ingangen elkaar

U1	U2	Uuit
0 V	0 V	0 V
+2 V	0 V	-2 V
0 V	+2 V	-4 V
+1 V	+1 V	-3 V
-2 V	+1 V	0 V
+5 V	-5 V	+5 V
$U_{uit} = -(U_1 + 2 * U_2)$		

**Figuur 54:** Het verband tussen de in- en uitgangsspanningen, zoals u het op uw analoge trainer proefondervindelijk kunt vaststellen.



**Figuur 55:** Vergelijking van de passieve en de actieve menger.

enigszins beïnvloeden. Ga maar na: stel dat U1 spanning voert en alle overige ingangen nul zijn. De stroom I1 zal dan niet alleen via weerstand R5 afvloeien, maar ook via R2, R3

en R4. Deze stromen kunnen de schakelingen, die op U2, U3 en U4 zijn aangesloten gaan beïnvloeden.

Een tweede nadelige eigenschap van de resistieve menger is de niet te verhinderen signaalverzwakking. Tussen een ingang en de uitgang staat steeds een weerstandsdeler. Voor ingang U1 is deze deler opgebouwd uit R1 en de parallel schakeling van R2, R3, R4 en R5. Het grootste gedeelte van de spanning valt over R1, er blijft erg weinig signaal over aan de uitgang.

Nu de actieve menger.

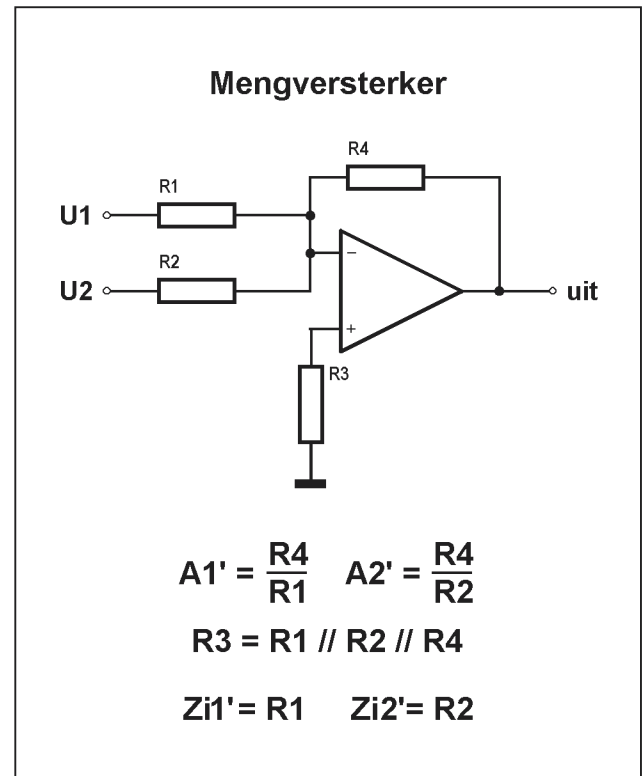
Deze heeft geen last van al die problemen. Immers, het mengpunt staat op massapotential, zonder echt met de massa verbonden te zijn. Men noemt zo'n punt een "virtueel massapunt". Het gedraagt zich als massa, de spanning op het punt is steeds nul, maar toch is het niet echt met de massa van de schakeling verbonden. Door dit virtueel massapunt zullen de diverse ingangen elkaar niet kunnen beïnvloeden. De stroom door en van de mengweerstand wordt alleen maar bepaald door de grootte van de op die ingang aangesloten spanning en verder door niets. Verder zal de schakeling geen signaalverzwakking tot gevolg hebben. Om deze twee redenen worden goede mengtrappen steeds volgens het principe van de inverterende versterker opgebouwd.

### Samenvatting

Figuur 56 geeft het bekende tabellarisch overzicht van de eigenschappen van de schakeling.

### Zélf meten

In de schakeling van figuur 53 heeft u met twee in- en een uitgangsgrootheid te maken. De resultaten van zo'n meting kunt u niet in een eenvoudig x/y-assenstelsel samenvatten, u heeft immers één as te weinig. Vandaar dat men in de praktijk werkt met meettabellen, waarin u zoveel grootheden kunt opnemen als de praktijk wil. Om u ook op dát gebied wat ervaring te laten opdoen hebben wij op de laatste pagina van dit hoofdstuk een lege tabel ingevoegd, waarin u uw meetresultaten kunt verwerken. U zet beide in-



**Figuur 56:** Samenvatting van de eigenschappen van de mengversterker.

gangen op een bepaalde spanning en meet de uitgangsspanning. De drie gemeten grootheden kunt u in één rij van de tabel invullen.

**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**

<b>U<sub>in1</sub> (V)</b>	<b>U<sub>in2</sub> (V)</b>	<b>U<sub>uit</sub> (V)</b>

## 8 De op-amp als rekenschakeling

### Inleiding

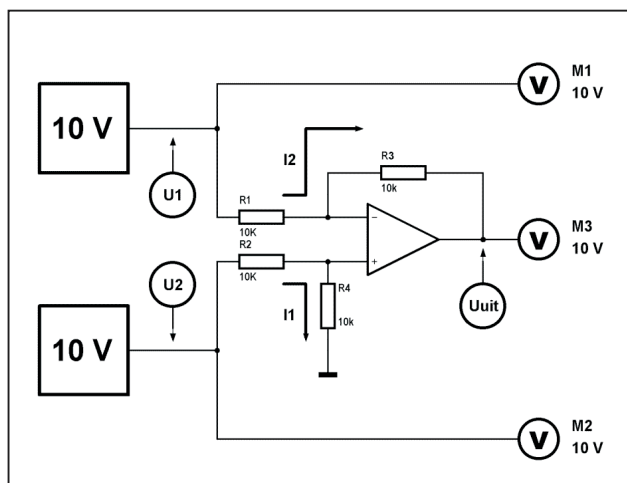
De in het vorige experiment beschreven menger was in feite niets meer dan een optelschakeling, die de waarde van twee ingangsspanningen bij elkaar optelde. De in dit zevende experiment beschreven verschilversterker is ook een rekenkundige schakeling, die de bewerking

$$A - B = C$$

uitvoert, waarbij A, B en C staan voor spanningen. De momentele waarde van één spanning wordt afgetrokken van de momentele waarde van een tweede en het resultaat wordt onder de vorm van een verschilspanning aan de uitgang gepresenteerd.

### Het basisschema

Figuur 57 geeft het basisschema van de verschilversterker. Deze schakeling wordt gekenmerkt door vier identieke weerstanden, die op de getekende wijze met de op-amp worden verbonden.



**Figuur 57:** De basisschakeling van een verschilversterker.

R1 is geschakeld tussen de eerste ingang en de inverterende ingang van de op-amp, R2 staat tussen de tweede ingang en de positie-

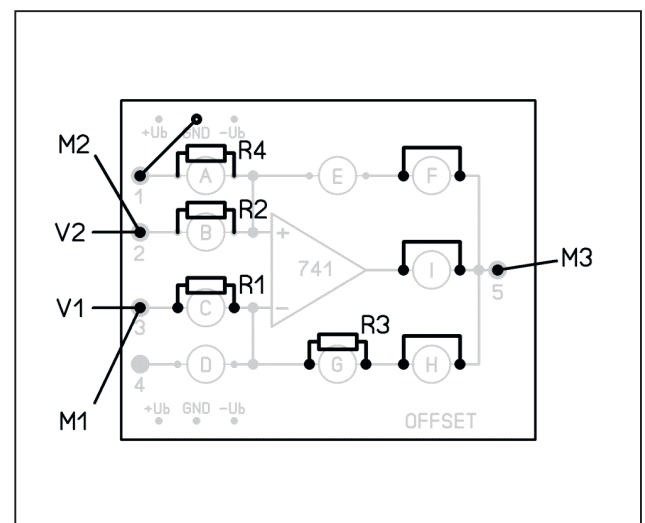
ve ingang van de versterker, R3 is als terugkoppellement opgenomen tussen de uitgang en de ingang van de operationele versterker en R4 staat gewoon tussen de niet-inverterende ingang en de massa geschakeld.

### Opmerking

Voorwaarde voor een goede werking is dat alle weerstanden aan elkaar gelijk zijn, zodat u in de praktijk meestal 1 % weerstanden moet toepassen.

### De schakeling op uw experimenteerprint

Aan de hand van figuur 58 zal het u wel niet veel moeite kosten deze verschilversterker op een van uw experimenteerprinten op te bouwen.



**Figuur 58:** De verschilversterker op uw experimenteerprint.

We schreven dat het gebruik van 1 % weerstanden wordt aanbevolen. Dat is alleen écht noodzakelijk als het er op aan komt twee spanningen zeer nauwkeurig van elkaar af te trekken. Voor de schakelingen op uw experimenteerprint is die absolute nauwkeurigheid niet nodig, zodat u vier normale weerstanden van 5 % en 10 kΩ uit het laatje kunt halen.

### Meten maar!

In de tabel van figuur 59 hebben wij een paar voorbeelden gegeven van geschikte spanningen die u, nadat u de schakeling op de experimenteerprint heeft opgebouwd, van elkaar kunt aftrekken. Stel de spanningen in aan de hand van de meters M1 en M2 en lees het resultaat af op M3.

U1	U2	Uuit
0 V	0 V	0 V
+1 V	0 V	-1 V
0 V	-1 V	-1 V
-1 V	-1 V	0 V
-5 V	+1 V	+6 V
-9 V	-5 V	+4 V
Uuit = U2 - U1		

**Figuur 59:** In deze tabel worden spanningsvoorbeelden gegeven die u op uw universele analoge trainer gemakkelijk kunt instellen.

### De werking van de schakeling

De werking van de schakeling berust, het wordt vervelend, op het door de operationele versterker weggeregelen van spanningsverschil tussen zijn beide ingangen.

Stel dat u U1 instelt op -1 V en U2 op +2 V. De positieve ingang van de op-amp staat dan op een spanning van +1 V. De weerstanden R2 en R4 vormen immers een spanningsdeeler. Bovendien zijn beide weerstanden aan elkaar gelijk, zodat hun knooppunt op de helft van de ingangsspanning staat. De schakeling zal de uitgangsspanning zó regelen, dat via de terugkoppelweerstand R3 dezelfde spanningsgrootte op de negatieve ingang verschijnt. Over weerstand R1 staat bijgevolg een spanning van 2 V, want de linker aansluiting voert -1 V en de rechter +1 V. De stroom I2 doorloopt R1 en R3. Beide weerstanden zijn even groot, de door de stroom opgewekte spanningsvallen eveneens. Over R3 valt ook 2 V, waarbij de linker aansluiting

negatief is ten opzichte van de rechter. De linker aansluiting staat op +1 V, de rechter staat bijgevolg op +3 V. Dat is dan ook de uitgangsspanning van de verschilversterker. De schakeling heeft de wiskundige bewerking:

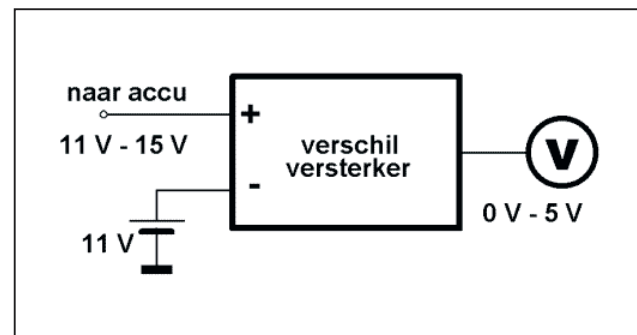
$$U_{\text{uit}} = U_2 - U_1$$

uitgevoerd, ga maar na:

$$+2 \text{ V} - (-1 \text{ V}) = +2 \text{ V} + 1 \text{ V} = +3 \text{ V}$$

### Toepassingen

De verschilversterker is een zeer handige schakeling, die u vaak uit schijnbaar onoplosbare problemen komt bevrijden. Eén toepassing van de verschilversterker is getekend in figuur 60. Als u de conditie van een accu wilt weten, meet u de klemspanning. Bij een goede accu ligt die tussen 11 V en 15 V. Met een normaal meetinstrumentje heeft u een schaalindeling van 0 V tot +15 V, waarbij het nuttige meetgebied slechts één derde van de schaal beslaat.



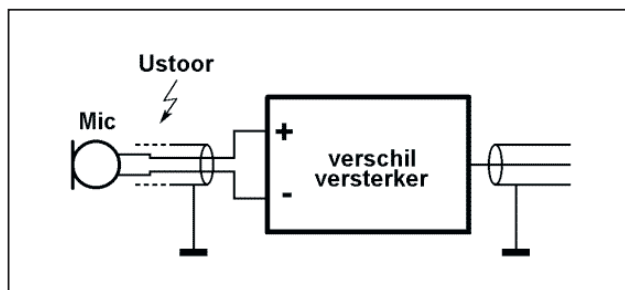
**Figuur 60:** Een verschilversterker, toegepast voor het onderdrukken van het nulpunt van een meter.

U kunt nu door het tussenschakelen van een verschilversterker het nulpunt van de meter onderdrukken, waardoor de schaalindeling loopt van +11 V tot en met +15 V. De verschilversterker hoeft van de variërende accu-spanning een vaste spanning van +11 V af te trekken. De uitgang van de versterker zal dan variëren tussen 0 V en +5 V. De meter heeft dan in feite een schaal die loopt van 0 V tot +5 V, maar in werkelijkheid lijkt u de schaal natuurlijk van +11 V tot +15 V. Dit geeft een



duidelijker en breed uitgesmeerde aflezing van de accuspanning.

Een andere toepassing van de verschilversterker is getekend in figuur 61. Als u kleine signalen over lange afstanden moet transporteren is de bekende afgeschermd kabel niet zo geschikt. Ondanks de afscherming pikt deze toch nog stoorsignalen op. Het is dan aan te bevelen te werken met symmetrisch transport. De twee aansluitingen van de signaalbron, bijvoorbeeld een microfoon, worden getransporteerd via een symmetrische kabel. De afscherming zit nu rond beide aders. Het voordeel is dat stoorsignalen nu in even grote mate in beide aders terecht komen.



**Figuur 61:** Een verschilversterker zet een symmetrisch signaal om in aan asymmetrisch signaal.

Voor de verdere signaalverwerking heeft u echter weer een asymmetrisch signaal nodig, één hete ader die spanning voert ten opzichte van de massa. Met behulp van een verschilversterker kan dat en bovendien raakt u eventuele stoorsignalen kwijt.

Een voorbeeldje maakt dat duidelijk.

Stel dat in het voorbeeld van figuur 61 de twee symmetrische aders signalen voeren van:

$$\begin{aligned} U_{\text{ader 1}} &= U_a + U_{\text{stoer}} \\ U_{\text{ader 2}} &= U_b + U_{\text{stoer}} \end{aligned}$$

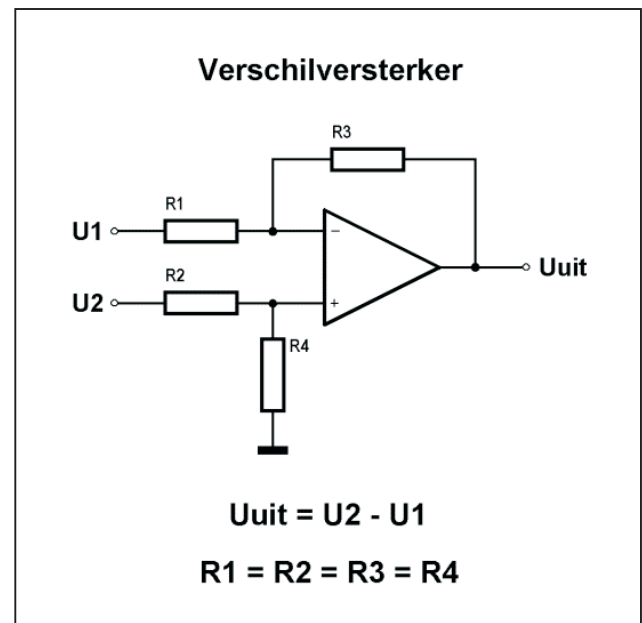
Beide signalen hebben dus een stoorpuls opgepikt. Op de uitgang van de verschilversterker staat:

$$\begin{aligned} U_{\text{uit}} &= U_{\text{ader1}} - U_{\text{ader2}} \\ U_{\text{uit}} &= (U_a + U_{\text{stoer}}) - (U_b + U_{\text{stoer}}) \\ U_{\text{uit}} &= U_a - U_b \end{aligned}$$

Het stoorsignaal is dus uit de signaalspanning verdwenen!

### Samenvatting

Figuur 62 geeft een samenvatting van de beschreven eigenschappen van de verschilversterker.



**Figuur 62:** Samenvatting van de eigenschappen van een verschilversterker.

### Experimenteren

Op de volgende pagina treft u weer een lege tabel aan, waarin u uw eigen meetwaarden kunt invullen. Stel de twee ingangen op willekeurige spanningen in, meet de uitgangsspanning en zet de drie waarden in een rij van de kolom. Ga nadien berekenen of uw schakeling voldoet aan de gegevens formule.

**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**

<b>U<sub>in1</sub> (V)</b>	<b>U<sub>in2</sub> (V)</b>	<b>U<sub>uit</sub> (V)</b>

## 9 De op-amp als differentiator

### Inleiding

Volgens het technisch woordenboek is een differentiator een schakeling, waarvan de uitgangsspanning recht evenredig is met de snelheid waarmee de ingangsspanning van waarde verandert.

Legt u aan een differentiator een constante spanning (een spanning die niet van waarde verandert in functie van de tijd), dan zal de uitgangsspanning van de differentiator nul zijn. Verandert u de ingangsspanning zeer snel van grootte, dan zal de differentiator een maximale uitgang leveren.

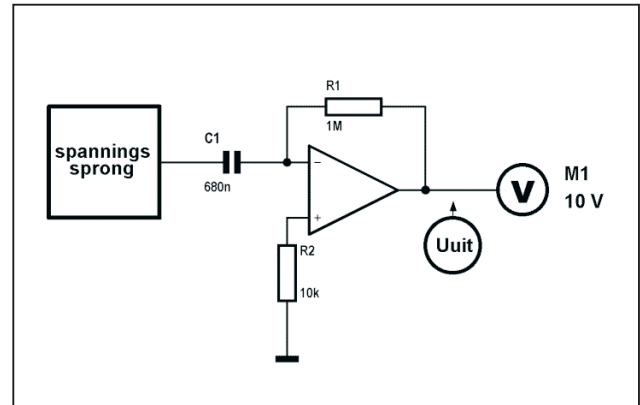
Een moeilijke definitie, maar u komt wel achter de betekenis als u zo'n differentiator op uw op-amp trainer aan de praat krijgt!

### Het basisschema

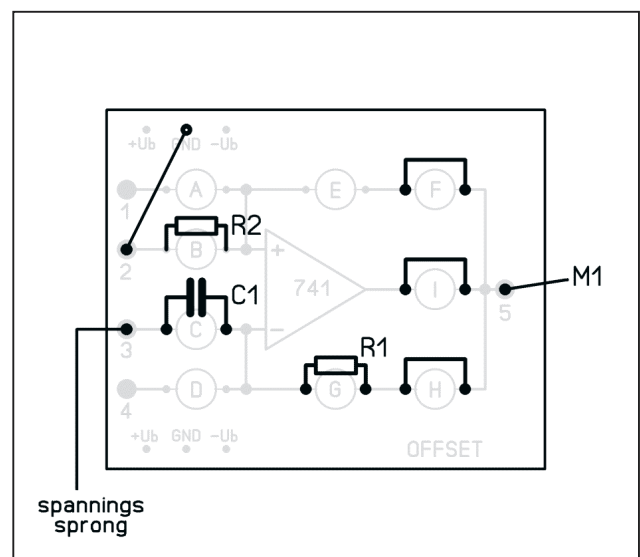
Het basisschema van de differentiator met operationele versterker is getekend in figuur 63. Een condensator C1 is geschakeld tussen de ingang en de inverterende aansluiting van de op-amp. De uitgang is door middel van een grote weerstand naar de inverterende ingang teruggekoppeld. De positieve ingang ligt aan de massa, via een weerstand R2.

### En nu op uw experimenteerprint

Bouw deze schakeling op uw experimenteerprint volgens het schema van figuur 64. Verbind de uitgang met een van de meters en de ingang met een van de twee gelijkspannings-uitgangen. Bij het inschakelen van het apparaat gaat de uitgang naar nul volt. Verdraai nu de potentiometer, die de waarde van de ingangsspanning bepaalt en let op de reactie van de meter. Telkens als u aan de potentiometer draait, zult u de meter even zien uitslaan. Als u de potentiometer met rust laat gaat de uitgang weer naar nul. Hoe sneller u de potentiometer verdraait, met andere woorden hoe sneller u de waarde van de ingangsspanning verandert, hoe groter de uit-



**Figuur 63:** Het basisschema van een differentiator.



**Figuur 64:** De differentiator op uw experimenteerprint.

slag van de meter en hoe meer uitgangsspanning de differentiator opwekt. Deze werking voldoet dus volledig aan de definitie van de differentiator!

### Een tweede experiment

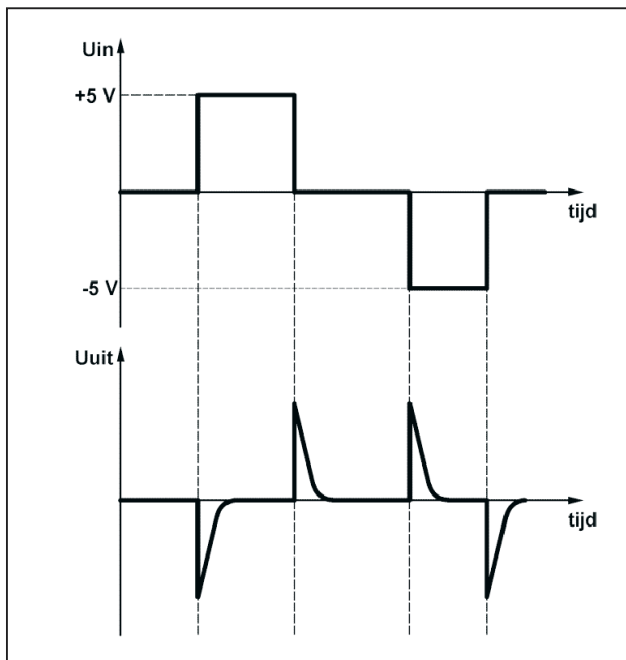
Wat kunt u met zo'n op eerste zicht vrij vreemde schakeling in de praktijk doen? U kunt er bijvoorbeeld plotselinge spannings-sprongen mee detecteren. Verbind de ingang van het experiment met de spannings-sprong uitgang van uw trainer en stel de twee

gelijkspanningen van de trainer in op +5 V respectievelijk -5 V.

Als u niets doet, dan is de uitgangsspanning van de schakeling nul. Logisch, want er treedt geen spanningsverandering aan de ingang op. Druk nu een van de drukknopjes in, waardoor de ingangsspanning plotseling naar +5 V of naar -5 V gaat. De uitgang reageert prompt en wekt een smalle negatieve of positieve puls op. Dat ziet u aan de snelle en forse meteruitslag. Als de ingangsspanning een positieve sprong doorloopt, dan zal de uitgangsspanning een negatieve puls opwekken. Er zit dus een inverterende werking in de schakeling, wat u niet hoeft te verbazen, want de ingangsspanning is aangesloten op de inverterende ingang van de op-amp!

### Grafische voorstelling

In figuur 65 is de werking van de schakeling grafisch voorgesteld.



**Figuur 65:** De werking van een differentiator grafisch voorgesteld.

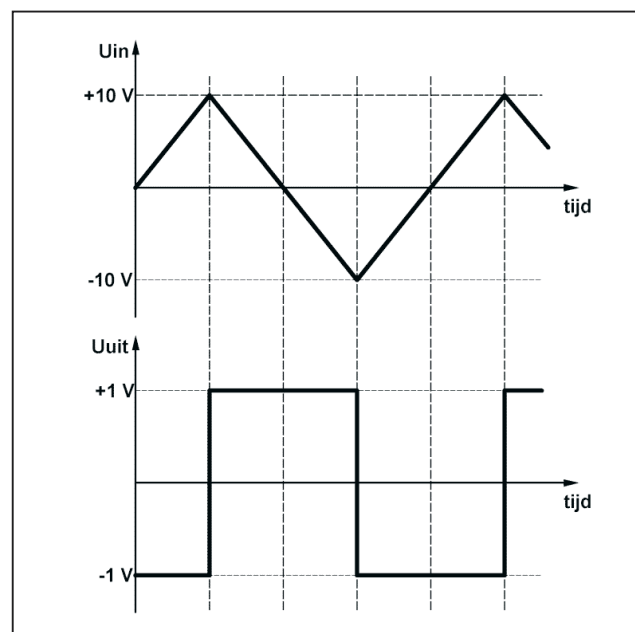
### Toepassingen

Differentiatoren worden vaak toegepast in de elektronica. Een differentiator was de basis-schakeling die ervoor zorgde dat uw oude analoge beeldbuis-TV een stabiel, stilstaand beeld opwekte.

Een tweede toepassingsvoorbeeld is een spetteronderdrukker waarmee u het geluid, veroorzaakt door krassen en stofdeeltjes op platen, kunt onderdrukken. De snelle spanningsvariatie in het geluidssignaal, veroorzaakt door de kras of het stofdeeltje, wordt door een differentiator uit het geluidssignaal gefilterd. De uitgangsspanning van deze schakeling schakelt de versterker dan even uit, zodat de kras niet meer zo storend overkomt.

Figuur 66 geeft een andere toepassing van de differentiator, namelijk het omzetten van driehoekspanningen in blokken. Dat kunt u ook simuleren op de trainer, dit apparaat heeft immers een ingebouwde functiegenerator, die driehoeken opwekt.

Sluit de uitgang van de generator aan op de differentiator. Bij een specifieke frequentie en grootte van de driehoek zal de uitgang van de differentiator een blokspanning opwekken, die symmetrisch verloopt ten opzichte van de nul. Ook dit gedrag is simpel te verklaren. De driehoeksspanning varieert lineair in de tijd. Dat wil zeggen dat de spanningsdaling of -stijging per tijdseenheid constant blijft. De differentiator reageert op deze constante spanningsvariatie door het opwekken van een constante spanning.

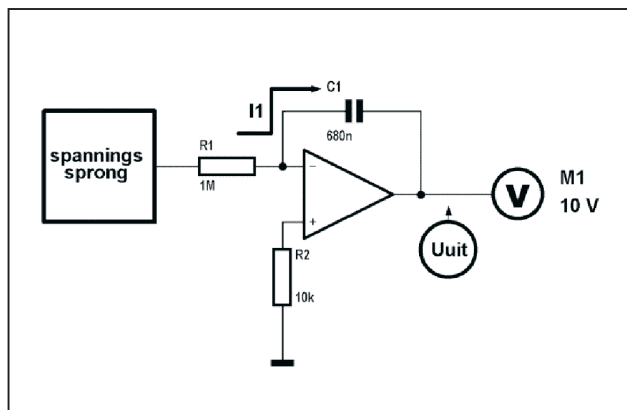


**Figuur 66:** Het omzetten van een driehoek in een blok met behulp van een differentiator.

# 10 De op-amp als integrator

## Inleiding

De differentiator uit hoofdstuk 9 was de eerste schakeling waar u een condensator gebruikte voor het instellen van de op-amp. Ook de integrator ontleent zijn specifieke eigenschappen aan het toepassen van een condensator. Kijk maar naar figuur 67, waar u het basisschema van een integrator ontdekt. U herkent zonder twijfel veel overeenkomsten met de differentiator, alleen de plaats van R en C is omgewisseld. De grote weerstand staat nu tussen de ingang van de schakeling en de inverterende ingang van de op-amp en de condensator koppelt de uitgangsspanning terug naar de inverterende ingang.



**Figuur 67:** Het basisschema van een integrator.

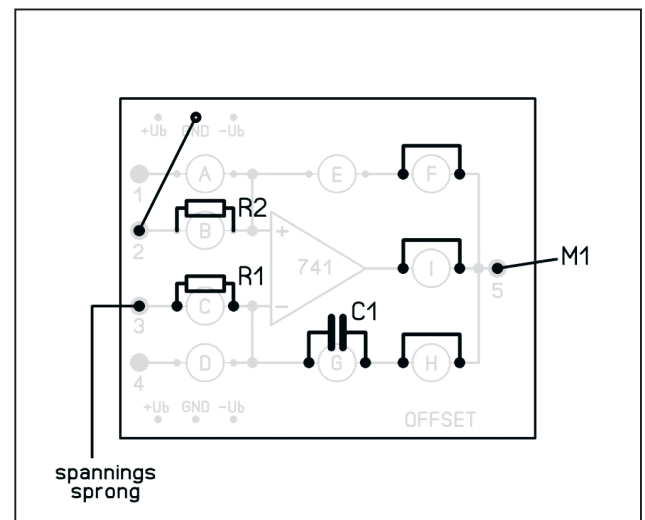
## Opmerking

Deze schakeling is zeer gevoelig voor offsetfouten, het is absoluut noodzakelijk een offset-gecompenseerde op-amp toe te passen! Uit de vorige experimenten weet u ondertussen hoe dat compenseren in zijn werk gaat.

## De integrator op uw experimenteerprint

De schakeling wordt opgebouwd op uw experimenteerprint, waarbij u de spanningsprong uitgang van de trainer als ingang voor de integrator gebruikt, zie figuur 68. Door in-

schakelverschijnselen bij het inschakelen van de voeding kan het voorkomen dat de uitgangsspanning een van nul afwijkende waarde aanneemt. Is dat het geval, dan moet u de condensator even kortsluiten, waardoor de uitgang naar nul gaat en op deze waarde blijft. Druk nu een paar seconden op een van de knopjes voor het opwekken van een spanningsprong.

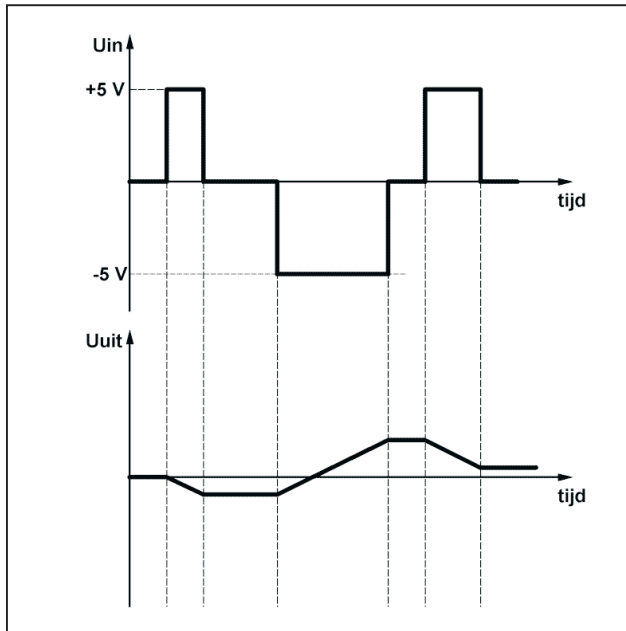


**Figuur 68:** De integrator in de praktijk op uw experimenteerprint.

De uitgangsspanning van de schakeling zal langzaam stijgen of dalen. Dat kunt u prachtig in de gaten houden op uw analoge uitgangsmeter. Na het loslaten van de knop blijft de spanning op de uitgang constant op de laatst gemeten waarde. Druk nu het andere knopje in. De uitgangsspanning gaat weer langzaam van waarde veranderen, maar nu in tegengestelde richting. Een en ander is grafisch weergegeven in figuur 69. Herhaal de experimenten met andere waarden voor de grootte van de spanningsprong. U stelt vast dat de snelheid van de spanningsvariatie op de uitgang afhankelijk is van de grootte van de sprong aan de ingang.

Noteer verder het inverterende karakter van de schakeling: een positieve sprong aan de





**Figuur 69:** De werking van de integrator grafisch voorgesteld.

ingang wekt een dalende uitgangsspanning op!

### De werking van de schakeling

Door het aanleggen van een spanning aan de ingang stuurt u een stroom  $I$  door de weerstand  $R1$ . Omdat de positieve ingang van de op-amp aan massa ligt, zal ook de invertende ingang op massa-potentiaal staan. De grootte van de stroom wordt alleen bepaald door de waarde van  $R1$  en door de grootte van de ingangsspanning. De inwendige weerstand van de op-amp is zeer groot, zodoende kan de stroom  $I$  alleen maar via de condensator naar de uitgang van de schakeling vloeien.

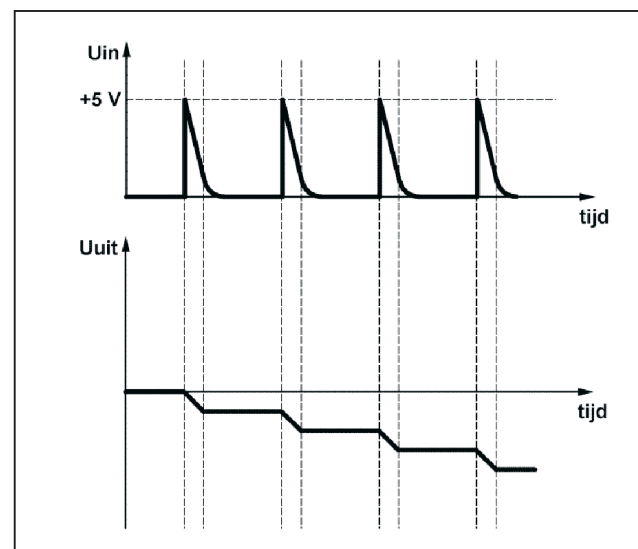
Nu weet u misschien dat een condensator, die wordt doorlopen door een constante stroom, over zichzelf een lineair stijgende (of dalende) spanning opbouwt. Dát nu, is hier het geval. De stroom  $I$  is constant zolang u de ingangsspanning niet varieert. De linker plaat van de condensator ligt aan de massa (virtueel nulpunt). De spanning op de rechter plaat en dus aan de uitgang van de schakeling zal lineair stijgen of dalen.

De integrator is als het ware een schakeling die onthoudt hoeveel spanning er gedurende een bepaalde tijd aan de ingang wordt aangeboden.

### Toepassingen

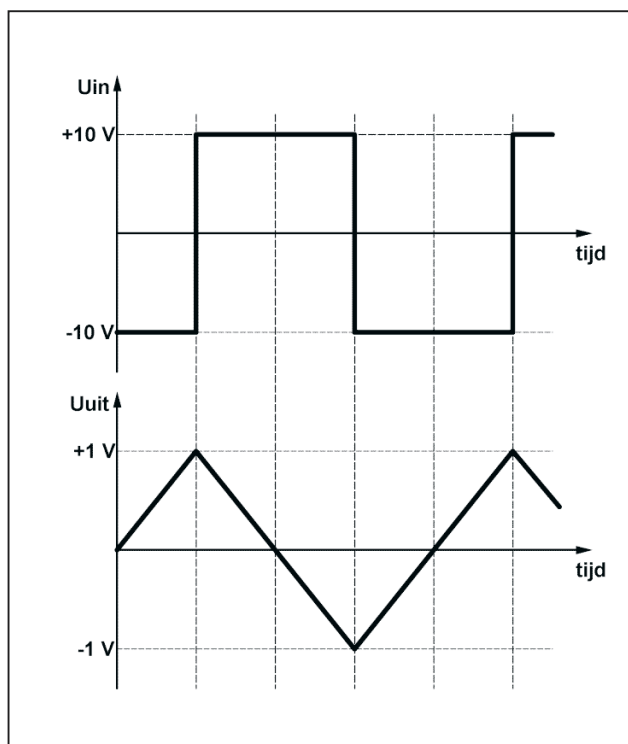
Met deze schakeling kunt u een aantal pulsen omzetten in een gelijkspanning, waarvan de grootte recht evenredig is met het aantal pulsen per tijdseenheid. Experimenteer maar even met de trainer aan de hand van figuur 70, dan wordt dit wel duidelijk!

Misschien verwacht u dat de spanning op de uitgang constant blijft als er geen ingangsspanning wordt aangeboden. Op de trainer kunt u echter vaststellen dat de uitgangsspanning zeer langzaam gaat dalen of stijgen. Dit wordt in de eerste plaats veroorzaakt door de lekstroom van de condensator. In de tweede plaats zijn de karakteristieken van operationele versterkers niet zo ideaal als we voor het gemak aannemen. Tussen de invertende ingang en de uitgang staat een weliswaar zeer hoge, maar toch aanwezige weerstand. Deze weerstand staat parallel over de condensator en zal dit onderdeel langzaam ontladen. Verder zal een niet volledig gecompenseerde offset er voor zorgen dat de uitgangsspanning langzaam gaat dalen of stijgen.



**Figuur 70:** Het omzetten van een aantal pulsen in een dalende spanning.

In figuur 71 is een andere toepassing van de integrator grafisch weergegeven. Als u een blokgolf aan de ingang aanlegt, kunt u een driehoek aan de uitgang aftakken. Ook hiermee kunt u naar hartelust experimenteren op de trainer!



**Figuur 71:** Het omzetten van een blokgolf in een driehoekspanning.

### Opmerking

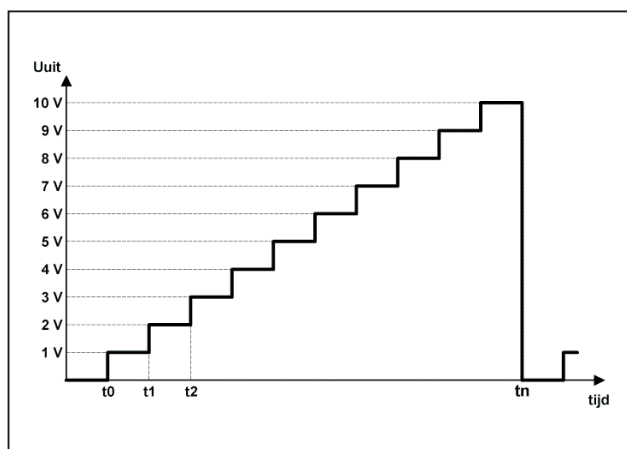
Een belangrijke toepassing van de integrator kan niet onbesproken blijven. In hoofdstuk 14 zullen we de integrator gebruiken als hart van een functiegenerator, een schakeling waarmee u driehoeken en blokgolven kunt opwekken en die in basis ook gebruikt wordt in het in de op-amp trainer ingebouwde 2207 functiegenerator IC.



# 11 De op-amp als trapspanninggenerator

## Inleiding

Een trapspanning ziet er uit zoals getekend in figuur 72. Zo'n spanning wordt gekarakteriseerd door het gegeven dat de grootte op ge-regelde tijden een bepaalde, vaste waarde stijgt of daalt. In het eerste geval spreken we van een positieve trapspanning, in het tweede van een negatieve.



**Figuur 72:** Portret van een positieve trapspanning.

Op het tijdstip  $t_0$  is de getekende spanning 0 V. Dat blijft zo tot  $t_1$ . Op dat moment wordt de spanning opeens 1 V groter en wordt dus 1 V. Dit blijft stabiel tot tijdstip  $t_2$ , waarop de spanning verhoogd wordt tot 2 V. Natuurlijk kan dat niet eeuwig blijven doorgaan, vandaar dat na  $t_n$  de spanning in elkaar stort tot 0 V en een nieuwe cyclus kan beginnen.

## Toepassingen

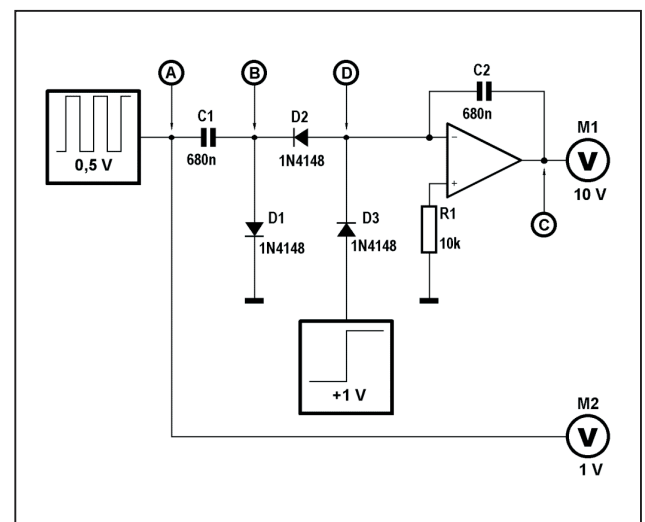
Dergelijke trapvormige spanningen worden gebruikt in de professionele elektronica voor het sturen van een spot naar diverse plaatsen op een beeldscherm, het omzetten van spanningen in frequenties en het versturen van diverse kanalen over één kabel. De hobbyist komt dit soort signalen tegen in bijvoorbeeld muzikale deurbellen, waarbij de trapspanning een frequentiegenerator stuurt en

iedere trap overeen komt met één muziektointje.

## Het schema

Het schema waarmee u op de universele op-amp trainer een trapspanning kunt genereren is getekend in figuur 73.

U herkent de basiseigenschap van een integrator: een condensator tussen de invertende ingang en de uitgang van de op-amp. Op de ingang sluit u de uitgang van de ingebouwde functiegenerator aan, geschakeld op blokspanning met een grootte van ongeveer 0,5 V.



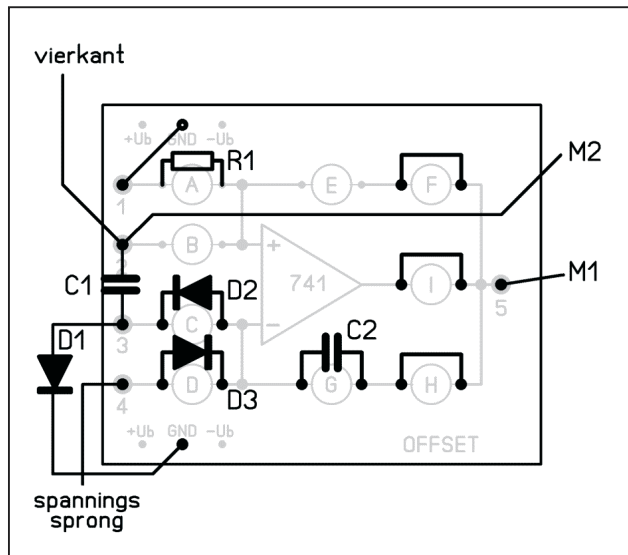
**Figuur 73:** Het schema van de experimentele trapspanninggenerator.

## Op de experimenteerprint

Het schemaatje kan volgens figuur 74 op uw experimenteerprint worden opgebouwd.

## Experimenteren

Na het inschakelen van de voedingsspanning zal de uitgang van de op-amp op nul volt staan. Bij iedere negatieve sprong van de ingangsspanning ziet u op de meter dat de uitgang ongeveer 1 V positiever wordt en op deze waarde blijft tot de volgende negatieve sprong aan de ingang.



**Figuur 74:** De schakeling op uw experimenteerprint.

De grootte van de trappen aan de uitgang kunt u instellen door het variëren van de grootte van de blok aan de ingang. Hoe kleiner deze spanning, hoe dichter de diverse trappen van de uitgang bij elkaar liggen.

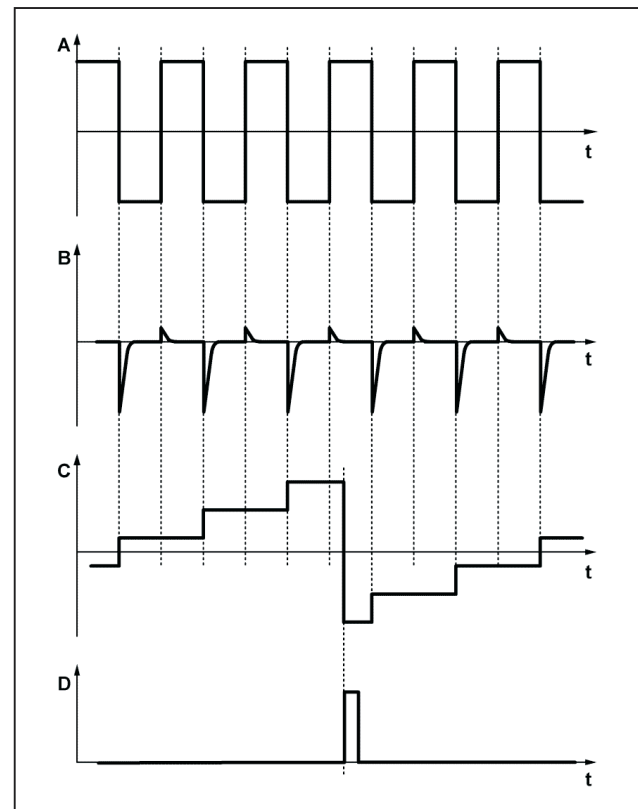
### Werking van de schakeling

De grafieken van figuur 75 verduidelijken een en ander. De vierkantgolf van de functiegenerator wordt gedifferentieerd door de condensator C1. Dat wil zeggen dat dit onderdeel alleen de plotselinge spanningsvariaties van +0,5 V naar -0,5 V (en omgekeerd) doorlaat. Een condensator heeft immers een bepaalde wisselspanningsweerstand. Hoe hoger de frequentie van een signaal, hoe minder weerstand een condensator biedt tegen de doorgang van dit signaal. De spanningsvariaties komen overeen met een signaal met een zeer hoge frequentie en de condensator zal deze delen uit het signaal ongehinderd doorlaten. Anders zit dat met de vlakke gedeelten van de vierkantgolf. Deze vertegenwoordigen een zeer lage frequentie en de weerstand van de condensator is dan zo hoog, dat dit signaal volledig wordt gesperd. Besluit: de vierkantgolf van de functiegenerator wordt door de condensator omgezet in korte positieve en negatieve pieken, zogenaamde naaldimpulsen.

Nu komt echter diode D1 op de proppen. Dit onderdeel gaat geleiden als de anode posi-

tiever is dan de kathode. Dat is het geval bij een positieve naaldpuls. Deze wordt dan ook door de geleidende diode kortgesloten naar de massa.

Op punt B ontstaat dus de in figuur 75 getekende spanning: smalle negatieve naaldimpulsjes bij iedere negatieve sprong van de vierkantgolf op de ingang.



**Figuur 75:** De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

De zeer kleine negatieve pulsjes, die u op figuur 75 getekend ziet, worden veroorzaakt door de 0,7 V geleidingsspanning van de diode en zijn de resten van de door de condensator doorgesleutelde positieve overgangen van de blok.

Vervolgens laat diode D2 van zich horen. Ook deze diode gaat geleiden als de anode positiever wordt dan de kathode. Dat is het geval bij een negatieve naald op punt B. De negatieve ingang van de op-amp wordt dan door de geleidende diode verbonden met de spanning op punt B. Het lijkt dan net alsof u de integrator gedurende een zeer korte tijd stuurt met een negatieve spanning. Zoals u uit hoofdstuk 10 heeft geleerd, reageert de inte-



grator daarop door het lineair opladen van de condensator.

De spanning op de uitgang wordt dan positief (de integrator inverteert immers). Nu gaat dat opladen heel erg snel: tussen de negatieve ingang en de spanning op punt B staat immers geen echte weerstand. Als u deze schakeling vergelijkt met deze van figuur 67 uit hoofdstuk 10, stelt u vast dat weerstand R1 uit dat experiment nu zo goed als nul is. De diode heeft uiteraard een kleine inwendige weerstand, maar deze is te verwaarlozen. De stroom I, die vanaf punt B door de geleidende diode D2 en de condensator C2 naar de uitgang van de op-amp vloeit, is zeer groot en vandaar dat de spanning over de condensator ook zeer snel gaat stijgen. Nadat de spanning over C2 ongeveer 1 V is gestegen, valt de negatieve naaldpuls op punt B weg. De diode D2 gaat sperren, de laadstroom van C2 wordt nul. De spanning over dit onderdeel en dus ook de spanning op de uitgang van de integrator blijft constant.

Bij de volgende negatieve naaldpuls zal er weer heel even een vrij grote stroom door D2 en C2 vloeien, waardoor de spanning over dit laatste onderdeel weer opeens met eenzelfde bedrag stijgt. De volgende trap van de trapspanning is tot stand gekomen.

### Het einde van een cyclus

Natuurlijk blijft dit proces zich niet eeuwig herhalen. Na een bepaald aantal stroompulssjes is de condensator opgeladen tot de positieve voedingsspanning en bij volgende negatieve pulssjes blijft de uitgang van de op-amp op +10 V staan. De schakeling loopt vast tegen de positieve voedingsspanning.

Als u nu even via de drukknop en via diode D3 een positief pulssje op de negatieve ingang van de op-amp zet, wordt de polariteit van de ingangsspanning van de integrator omgepoold, waardoor de laadstroom van C2 omkeert. De spanning daalt nu zeer snel van +10 V naar ongeveer -8 V, de uiterste negatieve limiet van de op-amp. Na het loslaten van de drukknop zal de uitgangsspanning van de schakeling weer trapvormig oplopen tot +10 V.

### Opmerking

Bij een “echte” trapspanninggenerator wordt dat wat u bij dit experiment met de hand doet, namelijk het beëindigen van een cyclus van de trapspanning, uiteraard elektronisch gedaan. Dat gaat vrij eenvoudig: met een comparator (zie hoofdstuk 12) vergelijkt u de waarde van de trapspanning met een bepaalde vaste spanning. Als de trapspanning groter zou willen worden dan dit referentieniveau, wekt de comparator een uitgangsspanning op. Deze spanning stuurt een schakelingetje dat even een positief pulssje aanbiedt aan de negatieve ingang van de op-amp. De uitgang van de schakeling wordt maximaal negatief, de volgende trapspanningsperiode kan worden opgebouwd.



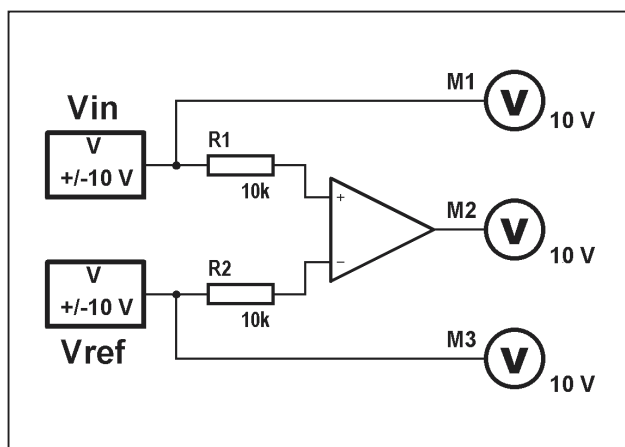
# 12 De op-amp als comparator

## Inleiding

Compareren betekent vergelijken. U kunt heel veel dingen met elkaar vergelijken, maar waar we het hier over gaan hebben is uiteraard het vergelijken van de grootte van twee spanningen. In hoofdstuk 11 hebben we het al even over zo'n schakeling gehad. Vergelijken of comparators worden vrij vaak toegepast in de elektronica, niet alleen voor het beëindigen van een cyclus van een trapspanning, maar bijvoorbeeld ook voor het resetten van een zaagtandspanning, het omvormen van analoge signalen tot digitaal te verwerken spanningen en het opwekken van alarmsignalen als een bepaalde spanning, die is afgeleid van een temperatuur, een druk of een vloeistofniveau, te hoog wordt.

## Het basisschema van een comparator

Het basisschema van een comparator is getekend in figuur 76. Wilt u vergelijken, dan heeft u twee grootheden nodig: eentje die u vergelijkt en eentje waarmee u vergelijkt.



**Figuur 76:** Het basisschema van een comparator.

Vandaar dat een comparator altijd twee ingangsspanningen heeft. De spanning  $U_{in}$  is de spanning die we willen vergelijken, de spanning  $U_{ref}$  is een (meestal) constante spanning waarmee we de  $U_{in}$  vergelijken.

De ene spanning wordt aangelegd aan de positieve ingang van de op-amp, de andere aan de negatieve ingang. Er is geen terugkoppeling opgenomen tussen de uitgang en een van de ingangen en door dit simpele feit is de werking van de schakeling in feite al duidelijk.

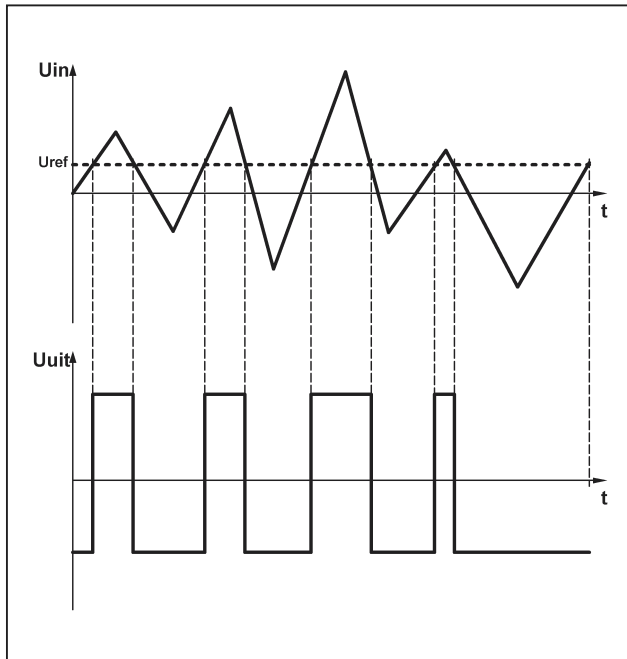
Even terug naar hoofdstuk 2. Daarin leerde u dat een operationele versterker een verschilversterker is die het spanningsverschil tussen zijn beide ingangen vele malen versterkt. De versterkingsfactor is zo groot, dat zelfs een spanningsverschil van een paar mV tussen de ingangen leidt tot een oversturing van de schakeling, dus tot het vastlopen van de uitgang tegen een van de voedingsspanningen.

Van deze eigenschap maakt u gebruik bij de comparator. Stel dat u  $U_{ref}$  instelt op +5 V. Als de spanning op de positieve ingang lager is dan die waarde, dan bestaat er een negatief spanningsverschil tussen de positieve en de negatieve ingang van de op-amp. Dit spanningsverschil wordt enige tienduizenden malen versterkt, zodat de uitgang van de schakeling de negatieve voedingsspanning opzoekt.

Als u nu de spanning op de positieve ingang langzaam laat stijgen, zal op een bepaald moment het spanningsverschil tussen beide ingangen van polariteit wisselen. De spanning op de positieve ingang wordt dan groter dan de spanning op de negatieve ingang. Ook dit spanningsverschil wordt tienduizenden malen versterkt, waardoor de uitgang van de schakeling opeens omschakelt van tegen de negatieve voedingsspanning naar tegen de positieve voedingsspanning. Kortom: het overschrijden door  $U_{in}$  van de referentiespanning, al is het maar met een paar mV, wordt door de schakeling gedetecteerd en levert een forse spanningssprong op aan de uitgang. Een handige eigenschap, waar u vaak gebruik van maakt!

### Grafische werking

In figuur 77 hebben wij de werking van de schakeling grafisch voorgesteld. De bovenste grafiek geeft het verloop van de ingangsspanning, in dit voorbeeld driehoekvormig. In stippellijn is de referentiespanning  $U_{ref}$  ingetekend. De onderste grafiek geeft de uitgangsspanning weer en u ziet dat deze positief is de ingangsspanning groter is dan de referentie.

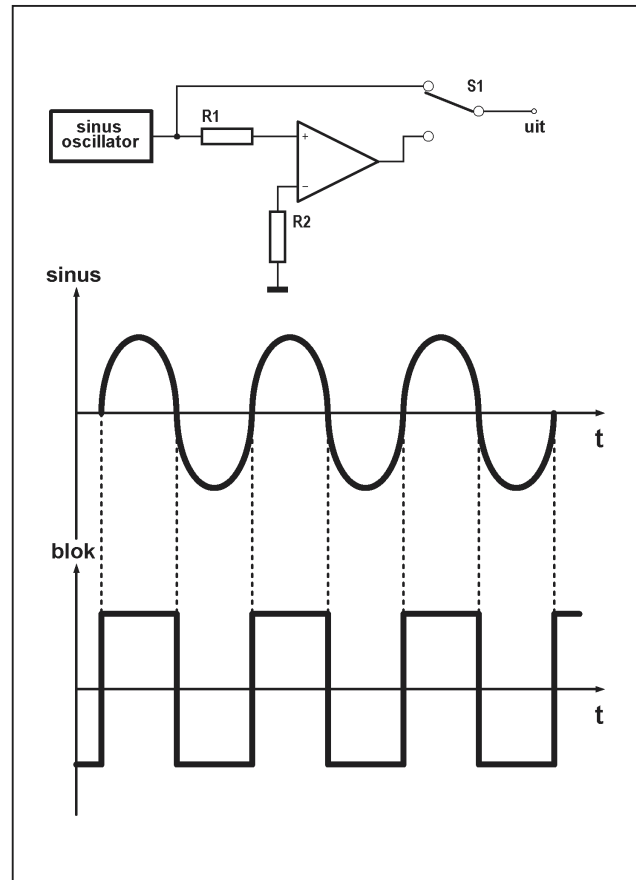


**Figuur 77:** De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

### Toepassingen

In figuur 78 maakt u kennis met een van de bekendste toepassingen van de comparator: het omzetten van een sinus in een blok. De goedkopere soort signaalgeneratoren, voor een tientje te koop als bouw pakket, die in het laboratorium worden gebruikt voor het opwekken van testspanningen, zijn meestal opgebouwd rond een sinusgenerator. Zo'n sinusspanning is erg handig voor het testen van bijvoorbeeld versterkers, maar soms heeft u behoefte aan een vierkantgolf. Door gebruik te maken van een comparator kunt u dit signaal afleiden uit de sinus. De referentiespanning van de comparator wordt dan ingesteld op 0 V, de uitgang schakelt dan telkens om bij de nuldoorgang van de sinus. De sinus wordt omgezet in een mooie symmetri-

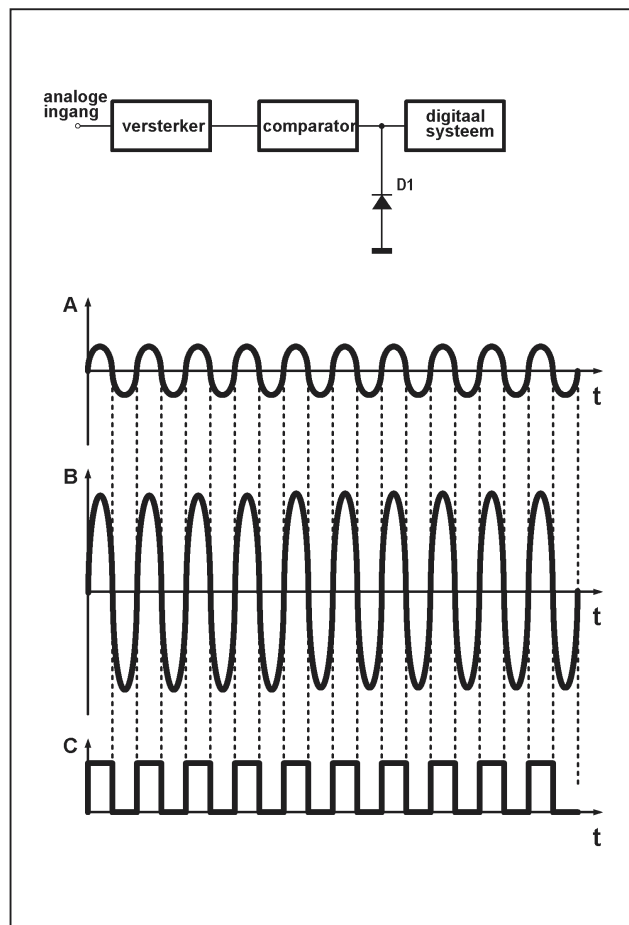
sche blokspanning met dezelfde frequentie als de sinus.



**Figuur 78:** Het eenvoudigste voorbeeld van de toepassing van een comparator: het omzetten van een sinus in een blok.

Door middel van de omschakelaar S1 kunt u kiezen tussen sinus of blok op de uitgang. Figuur 79 geeft een andere toepassing van de comparator. Als u de frequentie van een signaal digitaal wilt meten, dan moet u dat signaal eerst zo bewerken dat het geschikt is voor de digitale IC's in het meetsysteem. De analoge ingang wordt daarom eerst versterkt (signaal B) en nadien aangeboden aan een comparator. Deze maakt van hetingangssignaal een puls en deze puls kan door de digitale schakelingen worden verwerkt. Omdat digitale signalen werken met spanningen van 0 V tot +5 V of tot +12 V, moet de negatieve uitgang van de comparator worden begrensd tot 0 V. Vandaar de diode aan de uitgang, die gaat geleiden als de uitgang van de op-amp negatief wil worden. De meeste op-amp's kunnen deze kortsluiting

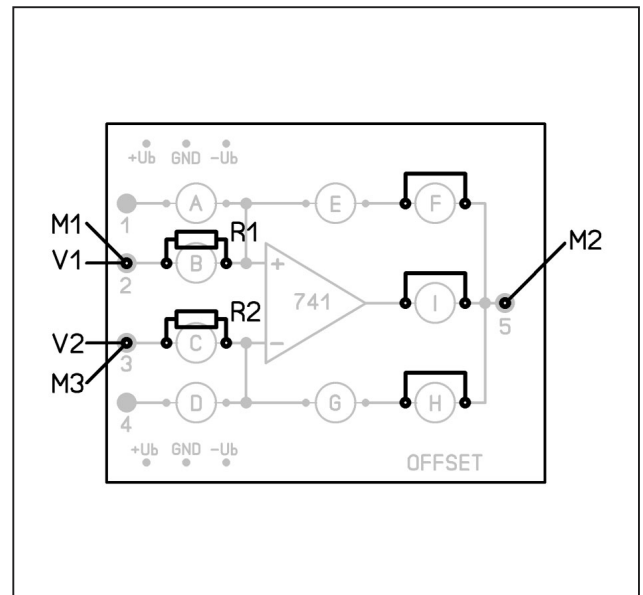
van hun uitgang bij negatieve uitgangsspanningen zonder meer verdragen.



**Figuur 79:** Het voorbereiden van een analogoog signaal op de digitale verwerking ervan.

### De comparator op uw trainer

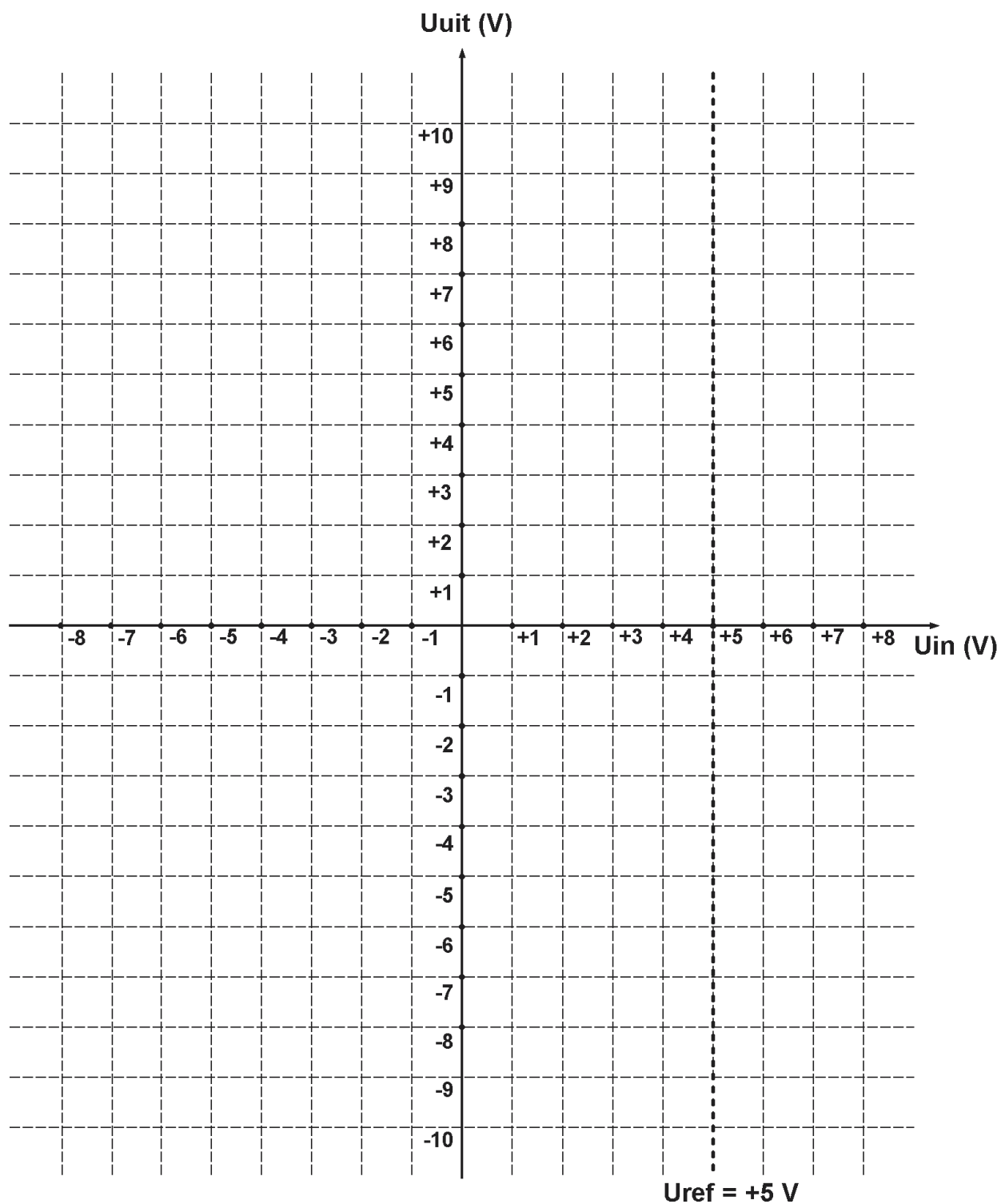
In figuur 80 hebben wij het basisschema van de comparator op de universele op-amp trainer opgebouwd. U heeft nu al zoveel ervaring met het experimenteren met dit apparaat, dat wij er zeker van zijn dat u zonder onze schriftelijke hulp aan de slag kunt met de zeer nuttige comparatorschakeling. U kunt uw meetresultaten weer invullen in de grafiek op de laatste pagina van dit hoofdstuk. Wij hebben de referentiespanning ingesteld op +5 V, u kunt nu de uitgangsspanning van de schakeling noteren voor verschillende waarden van de ingangsspanning.



**Figuur 80:** Het schema van de comparator op de trainer.



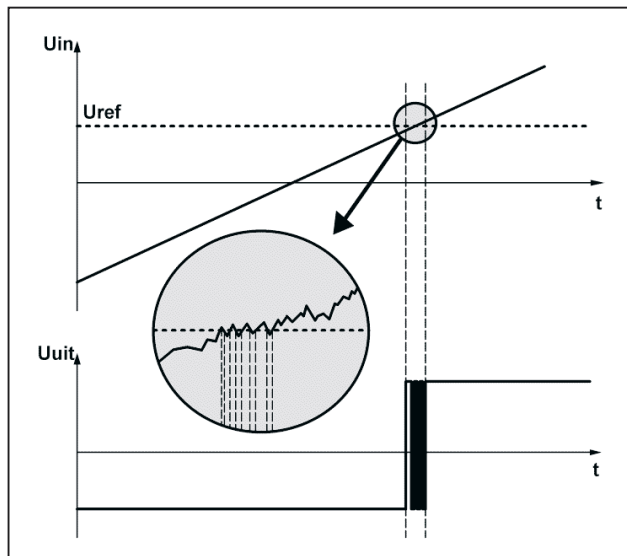
## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!



# 13 De op-amp als comparator met hysteresis

## Inleiding

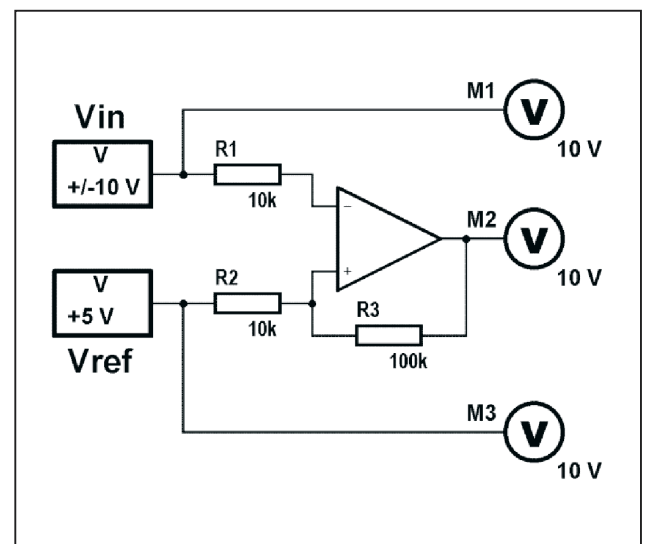
De eenvoudige comparatorschakeling uit hoofdstuk 12 is zo gevoelig, dat u af en toe maatregelen moet treffen om die gevoeligheid enigszins te temperen. Een spanningsverschil van een paar mV tussen de ingangsspanning en de referentie is voldoende om de uitgang van + naar - te laten omslaan. Soms kan het voorkomen dat er wat rimpel op de te vergelijken spanning zit, kijk maar naar figuur 81.



**Figuur 81:** De noodzaak van hysteresis wordt verduidelijkt aan de hand van dit voorbeeld.

Bij dit voorbeeld wordt de ingangsspanning afgeleid van een niveaudetector van een vloeistoftank. De comparator moet gebruikt worden om het bereiken van een bepaald vloeistofniveau in de tank te detecteren. Het volstromen van de tank veroorzaakt uiteraard golfjes op het oppervlak van de vloeistof en het instrument dat het niveau omzet in een spanning reageert ook op de golfjes. Vandaar dat de spanning die uit de tank komt niet gladjes stijgt met het stijgen van het niveau, maar vrij rimpelig. Ieder golfje in de tank veroorzaakt een rimpel op de spanning.

Zolang deze spanning veel lager is dan de referentiespanning is er niets aan de hand. De uitgang van de comparator is negatief. Als het vloeistofniveau in de buurt van de drempelwaarde komt, zal ook  $U_{in}$  de referentie benaderen. Door de golfjes in de tank en de rimpels op de ingangsspanning zal de uitgang van de comparator een aantal malen achter elkaar omschakelen. De rimpels zorgen er nu immers voor dat de ingangsspanning de ene keer net boven en de volgende keer net onder de referentie zit.



**Figuur 82:** Het schema van een comparator met hysteresis.

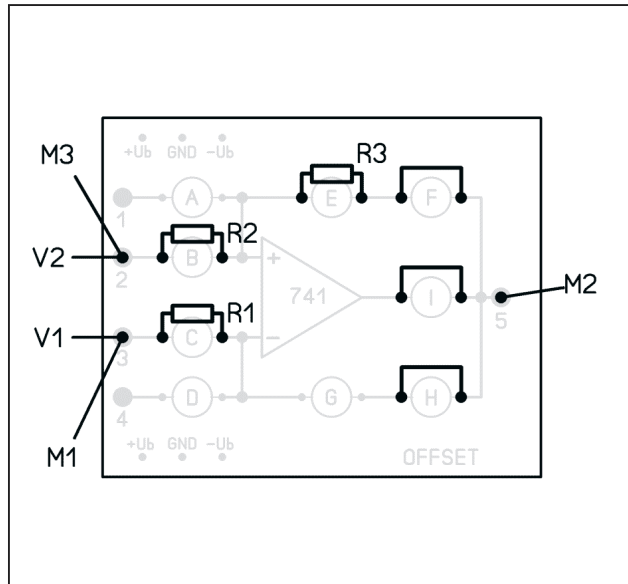
Dat diverse malen omschakelen van de uitgangsspanning kan zeer ongewenst zijn en vandaar dat men een speciale schakeling heeft verzonnen die eenduidig reageert op het overschrijden van een bepaalde drempel.

## Comparator met hysteresis

Dat is de comparator met hysteresis, waarvan het schema getekend is in figuur 82. Het enige verschil met de vorige schakeling is een extra weerstand, geschakeld tussen de uitgang van de op-amp en de positieve ingang.

### De schakeling op uw trainer

In figuur 83 is voorgesteld hoe u de schakeling op uw experimenteerprint kunt opbouwen.



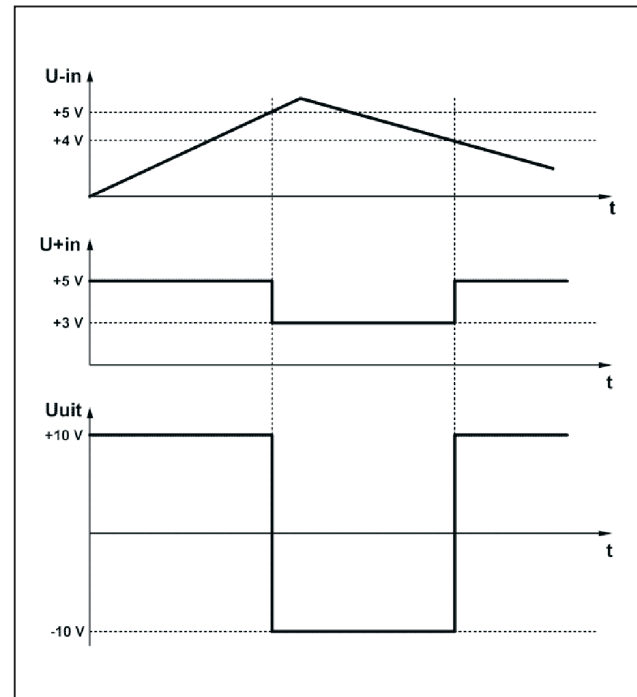
**Figuur 83:** De comparator met hysteresis op uw experimenteerprint.

### De werking van de schakeling

De werking van de hysteresis wordt verduidelijkt aan de hand van de grafieken van figuur 84. De te vergelijken spanning wordt nu aangeboden aan de negatieve ingang van de op-amp, de referentie aan de positieve.

Stel een referentie in van +5 V, gemeten aan de positieve ingang van de op-amp. Als de ingangsspanning lager is dan is de negatieve ingang van de operationele versterker, dan is de uitgang positief. De ingangsspanning stijgt, na een bepaalde tijd wordt ze iets positiever dan 5 V. De negatieve ingang van de op-amp wordt positief ten opzichte van de niet-inverterende ingang. De uitgang van de schakeling klappt om, wordt dus -10 V. De weerstanden R2 en R3 vormen een spanningsdeler tussen de referentiespanning en de uitgangsspanning. Doordat de uitgang op eens ongeveer 20 V in waarde daalt, zal er over weerstand R3 een grotere spanning vallen. Dat heeft tot gevolg dat de spanning op de positieve ingang daalt. De verhouding van R2 tot R3 zorgt er in dit specifieke geval voor dat de spanning daalt tot +3 V. Het gevolg is dat de ingangsspanning moet dalen tot deze

nieuwe referentiewaarde, alvorens de comparator reageert.



**Figuur 84:** De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

### Hysteresisverschijnsel

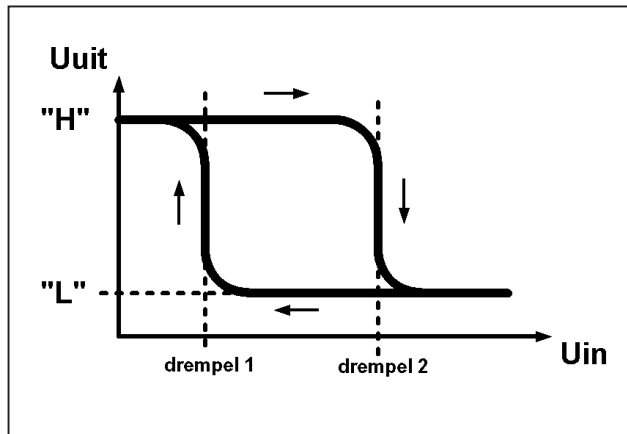
Het feit dat de comparator nu twee verschillende referentieniveaus heeft, een voor stijgende ingangsspanning en een lagere voor dalende ingangsspanning, noemt men het hysteresisverschijnsel. Het spanningsverschil tussen beide referenties noemt men de hysteresis. De getekende schakeling heeft dus een hysteresis van 2 V.

Het voordeel van dit systeem is duidelijk. Zou de ingangsspanning rimpels vertonen, dan zullen die toch niet een herhaaldelijk omschakelen van de uitgang kunnen veroorzaken. Immers, de schakeling schakelt om op het moment dat de ingangsspanning voor het eerst de bovenste referentie overschrijdt. Automatisch stelt de comparator een lagere referentie in, de volgende rimpels zitten ver boven de nieuwe referentie en de uitgang van de schakeling blijft stabiel. Hetzelfde gebeurt bij de dalende ingangsspanning.

### De transferkarakteristiek

Wij zij het begrip "transferkarakteristiek" al eerder tegengekomen. Deze geeft het ver-

band tussen de in- en de uitgangsspanning. De transferkarakteristiek van een comparator mét hysteresis is getekend in figuur 85. De pijltjes geven aan hoe deze karakteristiek wordt doorlopen. Als u deze grafiek even vergelijkt met de grafieken van figuur 84 wordt een en ander duidelijk.

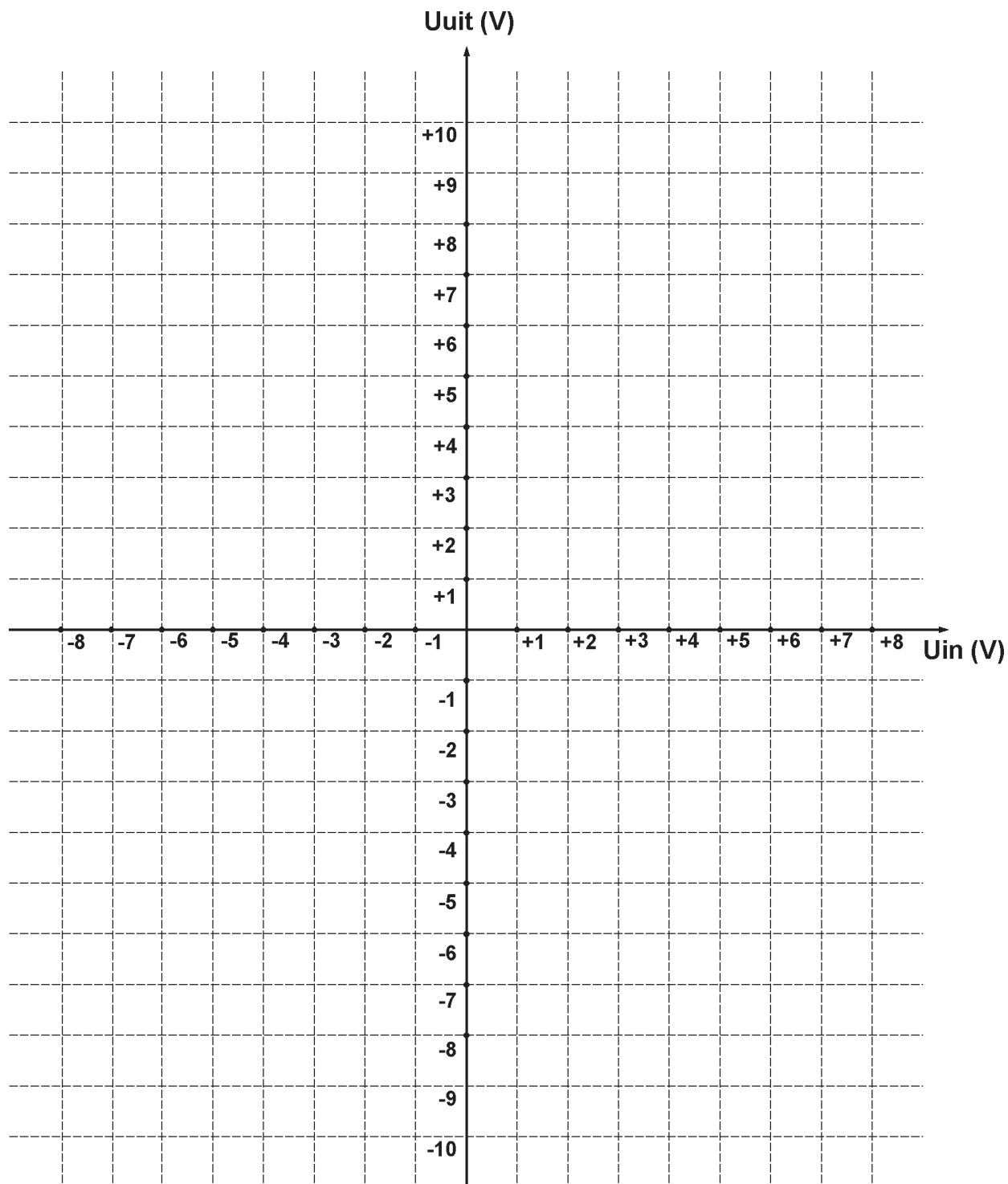


**Figuur 85:** De transferkarakteristiek van een comparator met hysteresis.

### Zélf meten

Op de grafiek op de laatste pagina van dit hoofdstuk kunt u de transferkarakteristiek van uw eigen schakeling opmeten. U moet eerst de ingangsspanning stapsgewijs verhogen van -8 V tot +8 V en nadien weer stapsgewijs verlagen tot -8 V. U ziet dan hoe, dank zij de hysteresis, de uitgangsspanning bij twee verschillende ingangsspanningen omschakelt. Varieert vervolgens de waarde van weerstand  $R_3$  en merk hoe de breedte van het hysteresisgebied hierdoor verandert.

## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!





# 14 De op-amp als functiegenerator

## Inleiding

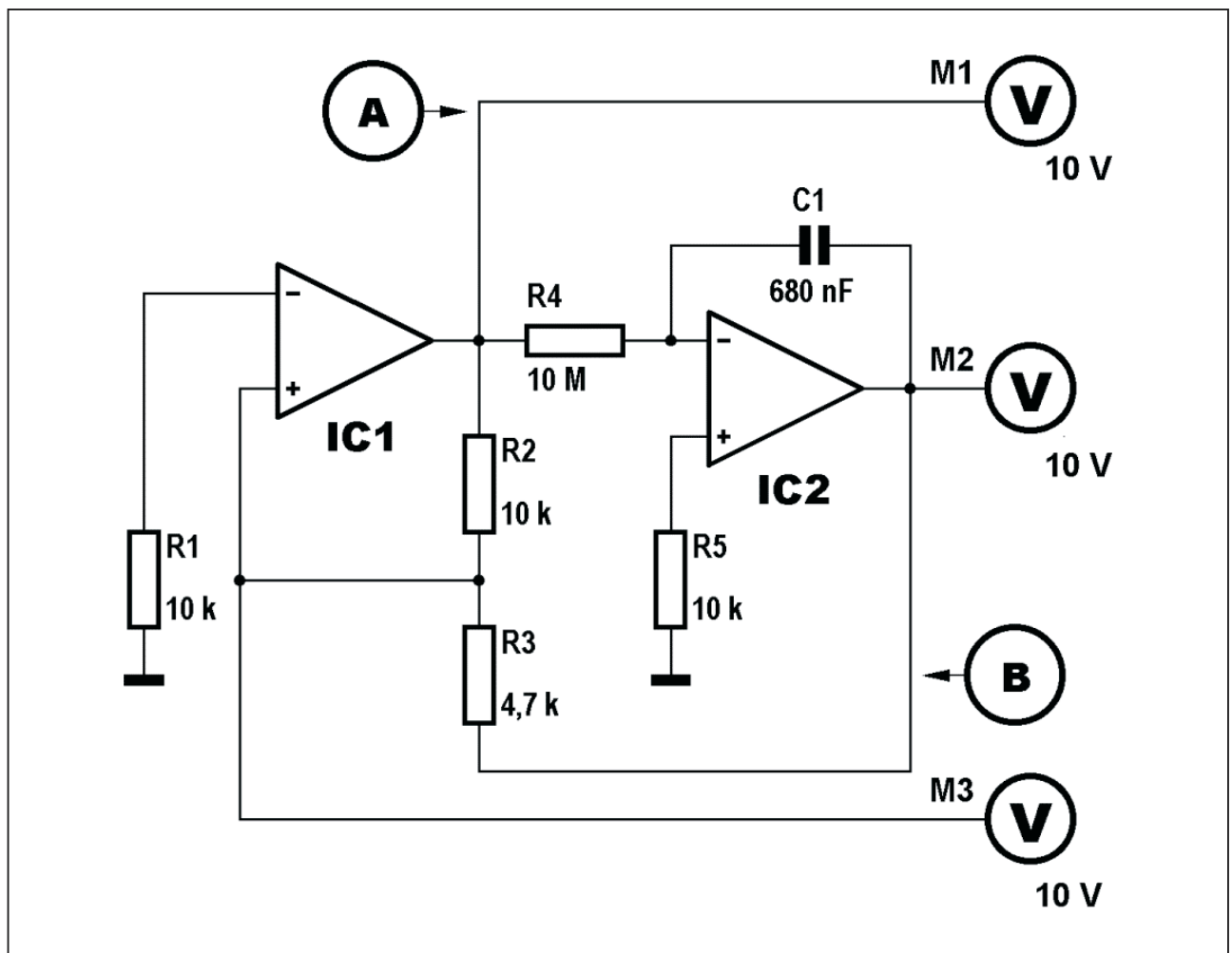
De functiegenerator is het eerste experiment, waarbij u twee operationele versterkers inschakelt en waarvoor het dus nodig is dat twee 741 experimenteerprintjes ter beschikking staan.

Een functiegenerator is een schakeling die diverse signaaltvormen kan opwekken. In de meest eenvoudige uitvoering, zoals besproken in dit experiment, levert de schakeling driehoek- en blokvormige signalen. Meer uitgebreide schakelingen, zoals ingebouwd in de diverse in de handel zijnde functiegeneratoren, leveren daarnaast ook nog eens sinusen, zaagtanden en pulsen.

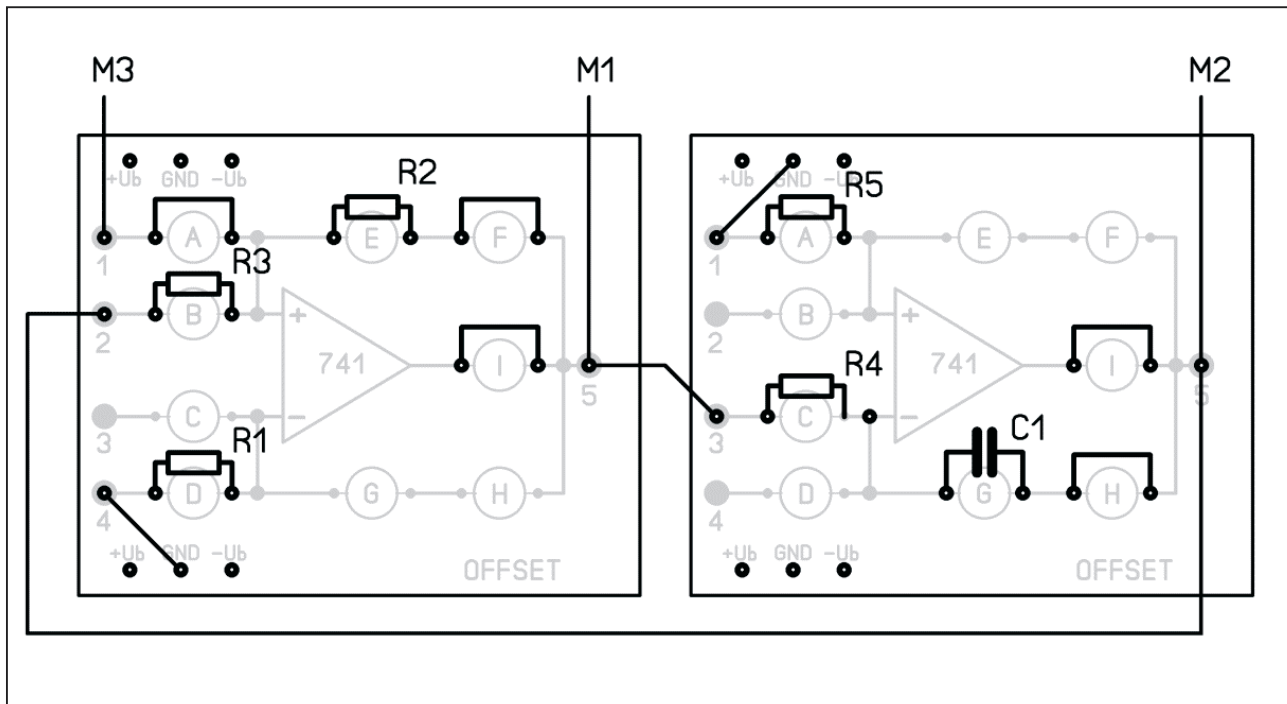
## De basisschakeling

De basisschakeling, getekend in figuur 86, is opgebouwd uit twee reeds bekende trappen. U herkent ongetwijfeld de comparator met hysteresis rond operationele versterker IC1 en de integrator rond IC2. Beide schakelingen hebben we besproken in de hoofdstukken 10 en 13.

De comparator levert de stuurspanning voor de integrator, de integrator levert de ingangsspanning voor de comparator. U heeft dus te maken met een rondgekoppeld systeem: de uitgang stuurt de ingang en deze terugkoppeling veroorzaakt het opwekken van een periodiek terugkerende spanning. Anders



**Figuur 86:** Het basisschema van een functiegenerator.



**Figuur 87:** De basisschakeling van een functiegenerator op twee experimenteerprinten.

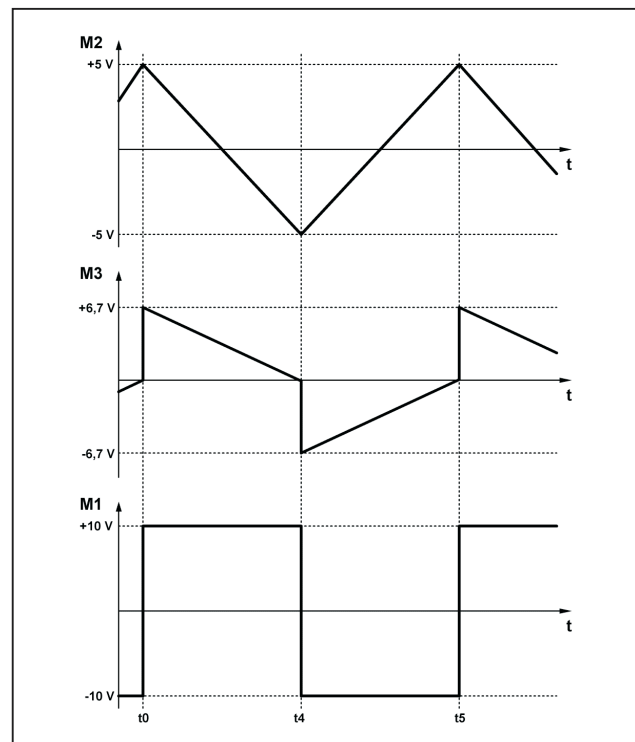
gezegd: door de terugkoppeling zal de schakeling gaan oscilleren.

### De basisschakeling op de experimenteerprinten

Bouw het schakelingetje op volgens de bedradingstekening van figuur 87 op twee experimenteerprintjes. Als u de trainer met de netspanning verbindt stelt u vast dat op de uitgang van de schakeling een driehoekvormige spanning ontstaat (meter M2), terwijl op de uitgang van de eerste op-amp (meter M1) een blokvormige spanning verschijnt.

### De werking van de schakeling

De werking van deze schakeling wordt verklaard aan de hand van de grafieken van de figuren 88 en 89. Belangrijk voor het begrijpen van de werking is dat de positieve ingang van IC1 is verbonden met het knooppunt van twee weerstanden R2 en R3. Weerstand R2 gaat naar de uitgang van de comparator, weerstand R3 naar de uitgang van de integrator. Beide weerstanden vormen een spanningsdeler en het zal duidelijk zijn dat de spanning op de positieve ingang van de comparator zowel door de uitgangsspanning van de comparator als door de uitgangsspanning van de integrator wordt bepaald.



**Figuur 88:** Het verloop van de spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

Bovendien moet u voor ogen houden dat de negatieve ingang van de comparator via R1 is verbonden met de massa. Hieruit kunt u afleiden dat de uitgang van de comparator omschakelt van de ene naar de andere voe-

dingsspanning op het moment dat de spanning op de positieve ingang (dus knooppunt R2 - R3) gelijk wordt aan nul volt.

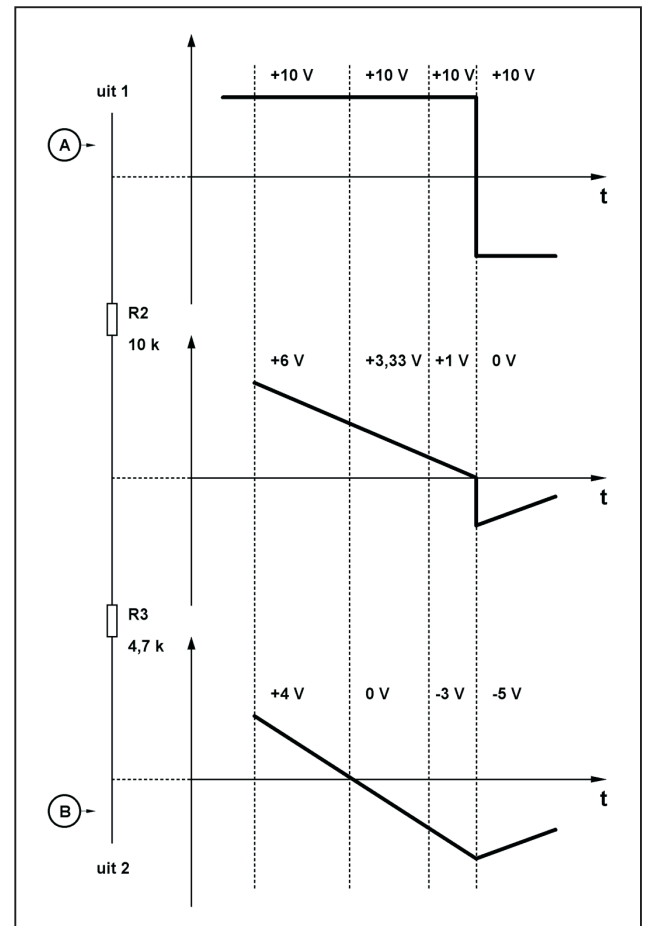
Ga er van uit dat de spanning op de uitgang van de comparator op een bepaald moment  $t_0$  gelijk is aan +10 V. Stel vervolgens (waarom volgt later) dat de uitgang van de integrator zich op hetzelfde moment op een spanning van +5 V bevindt. U kunt nu de spanning op de positieve ingang van de comparator berekenen. U weet immers de waarden van beide weerstanden R2 en R3, want R2 is gelijk aan tweemaal de waarde van R3. Bovendien weet u dat over de serieschakeling van beide weerstanden een spanning staat van 5 V. Punt A staat immers op +10 V en punt B is, zo heeft u verondersteld, +5 V. Het spanningsverschil van 5 V staat over in totaal 15 k $\Omega$  (we ronden de praktische waarde van R3 maar even af naar 5 k $\Omega$ ).

Nu weet u uit de wet van Ohm, dat de spanningen over in serie geschakelde weerstanden zich verhouden zoals de deelweerstand.

Met andere woorden: over R2 valt dubbel zoveel spanning dan over R3. Even nadenken leert dat de totale spanning van 5 V zich dus verdeelt in ongeveer 3,4 V over R2 en ongeveer 1,7 V over R3. De positieve ingang van de comparator staat bijgevolg op een spanning van +6,7 V, de som van de +5 V op punt B en de 1,7 V spanningsval over R3.

### Wat gebeurt er verder?

De ingang van de integrator wordt gestuurd met een positieve spanning van +10 V. Uit een van de vorige experimenten weet u dat de schakeling hierop reageert door het lineair laten dalen van de uitgangsspanning. Nu zijn zowel R4 als C1 vrij groot, die daling gaat dus erg langzaam en u kunt het proces op uw meetinstrumenten volgen. Het dalen van de uitgangsspanning heeft tot gevolg dat ook de spanning op de positieve ingang van IC1 gaat dalen. In figuur 89 hebben we dat getekend. Als de uitgangsspanning van de integrator gedaald is tot -3 V, staat er nog een positieve spanning van 1 V op de comparator. Deze spanning nadert dus wel langzaam maar zeker het omschakelpunt van de com-



**Figuur 89:** Gedetailleerde grafische verklaring van het spanningsverloop op de positieve ingang van de comparator.

parator, namelijk nul volt (negatieve ingang comparator is immers nul volt). U kunt dan ook precies bepalen wanneer de comparator zal omklappen.

Als de uitgang van de integrator is gedaald tot -5 V, verdeelt de totale spanning over R2 - R3 zich zo dat het knooppunt op nul volt staat. Op dit tijdstip  $t_4$  slaat de comparator om, de uitgangsspanning wordt gelijk aan de negatieve voedingsspanning. De spanningsverdeling over R2 en R3 wijzigt zich dan drastisch. Punt A springt naar -10 V, punt B staat op -5 V. Over beide weerstanden staat 5 V, het knooppunt komt op een spanning van -6,5 V. De uitgangsspanning van de integrator gaat nu stijgen. Deze schakeling wordt nu immers uit een negatieve spanning van -10 V gevoed.

Een en ander heeft tot gevolg dat de spanning op de positieve ingang van de comparator nu weer gaat stijgen. Op tijdstip  $t_5$  is de

uitgang van de integrator gestegen tot +5 V, het knooppunt van R2 en R3 komt op massapotentiaal, de comparator slaat weer om. De functiegenerator heeft één cyclus doorlopen, de volgende start.

**Conclusie**

Het samenwerken van integrator en comparator levert een schakeling op die continu een driehoek en een blok opwekt. De frequentie van die signalen wordt bepaald door de waarde van R4 en C1. Hoe kleiner beide onderdelen, hoe sneller de condensator zich zal op- en ontladen en hoe hoger de frequentie van de uitgangssignalen. In de praktijk schakelt u C1 om naar waarden die 10, 100 of 1.000 maal groter of kleiner zijn. Dat is de bereikenschakelaar van de frequentie. Door R4 als potentiometer uit te voeren kunt u in ieder bereik de frequentie een factor 10 variëren.

**Opmerking**

De door u opgebouwde schakeling zit tegenwoordig in één IC'tje. Het IC XR2207 bijvoorbeeld, gebruikt in de functiegenerator van de op-amp trainer, is zo'n samengesteld IC.

# 15 De op-amp met niet-lineaire terugkoppeling

## Inleiding

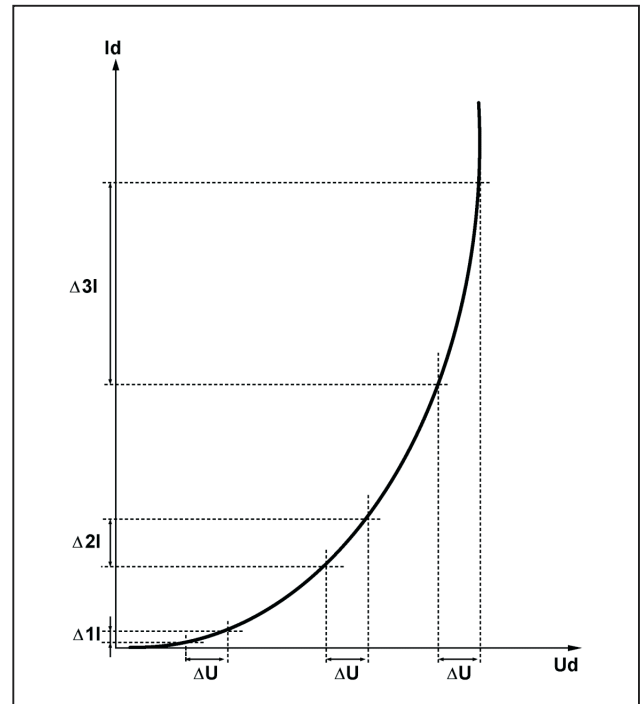
Tot nu toe heeft u bijna steeds een terugkoppeling tussen de uit- en ingangen van de op-amp aangebracht, opgebouwd uit één weerstand. Zo'n terugkoppeling noemt men **lineair**, omdat hij dezelfde terugkoppelingsfactor oplevert voor gelijk welke spanningsgrootte aan in- of uitgang. Een weerstand van 1 k $\Omega$  is immers een weerstand van 1 k $\Omega$ . Nu bestaan er echter ook **niet-lineaire** onderdelen. Dat zijn componenten waarvan de weerstandswaarde afhankelijk is van de grootte van de spanning over het onderdeel, of van de grootte van de stroom door het onderdeel.

De gewone siliciumdiode, zoals de 1N4148, is een typisch voorbeeld van een niet-lineair element. Dat kunnen we aantonen aan de hand van de stroom/spanning-karakteristiek, getekend in figuur 90. Deze grafiek geeft het verband tussen de spanning over de diode en de stroom die als gevolg van het aanleggen van deze spanning door het onderdeel gaat lopen. Dit verband is niet-lineair. Als de spanning klein is (ongeveer 0,1 V) dan loopt er een zeer lage stroom door de diode. Als u de spanning verdubbelt, dan stelt u vast dat de stroom meer dan verdubbelt.

Als u een spanning van 1 V over de diode zet, dan kunt u heel even vaststellen dat de stroom zeker een factor 1.000 groter wordt, waardoor het onderdeel dadelijk smelt!

## Inwendige weerstand Ri

Wat betekent dat niet-lineaire verband? Uit de samenhang tussen spanning en stroom kunt u de inwendige weerstand van het onderdeel afleiden. De weerstand wordt immers door de wet van Ohm gegeven als het resultaat van het delen van de spanning door de stroom. In figuur 90 hebben we op de spanning-as op drie plaatsen een gelijk spanningsgebied  $\Delta V$  afgemeten. U kunt dan op de stroom-as aflezen hoeveel de stroom



**Figuur 90:** Het verband tussen de spanning over en de stroom door een diode is niet-lineair.

door de diode varieert als u de spanning met  $\Delta V$  laten stijgen. Hieruit blijkt dat de stroomvariatie  $\Delta I$  veel kleiner is dan  $\Delta I_2$ . Uit de wet van Ohm volgt dat de inwendige weerstand van de diode wordt gegeven door:

$$R_i = \Delta V / \Delta I$$

Een kleine stroomvariatie voor een bepaalde spanningsvariatie  $\Delta V$  komt dus overeen met een hoge inwendige weerstand. Een grote stroomvariatie voor dezelfde spanningsvariatie  $\Delta V$  komt overeen met een lage inwendige weerstand.

## Conclusie

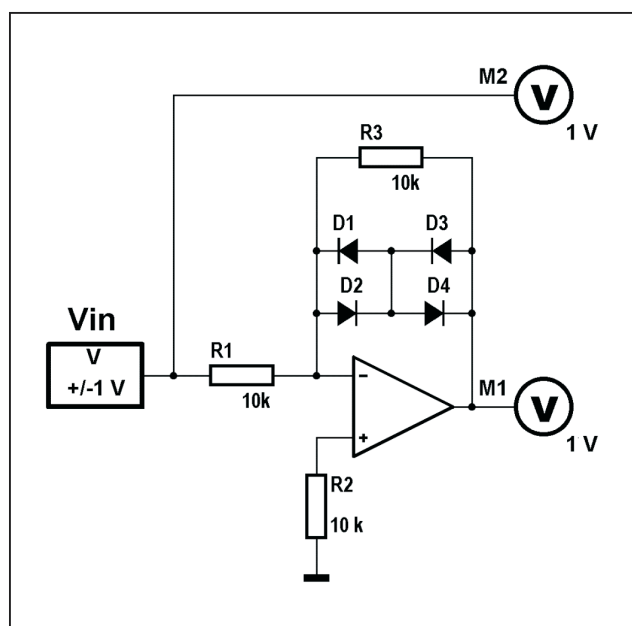
Als u de spanning over een diode laat stijgen van 0 V tot 0,6 V, dan varieert de inwendige weerstand tussen bijna oneindig tot bijna nul. Van deze eigenschap kunt u gebruik maken



voor het opbouwen van een niet-lineaire terugkoppeling bij een op-amp.

### Het schema

Het schema is getekend in figuur 91. De ingangsspanning schakelt u aan de inverterende ingang. Tussen deze ingang en de uitgang neemt u een netwerkje op, opgebouwd uit een vaste weerstand R3 en vier dioden. Het schema voldoet aan de basisopzet van een inverterende versterker.



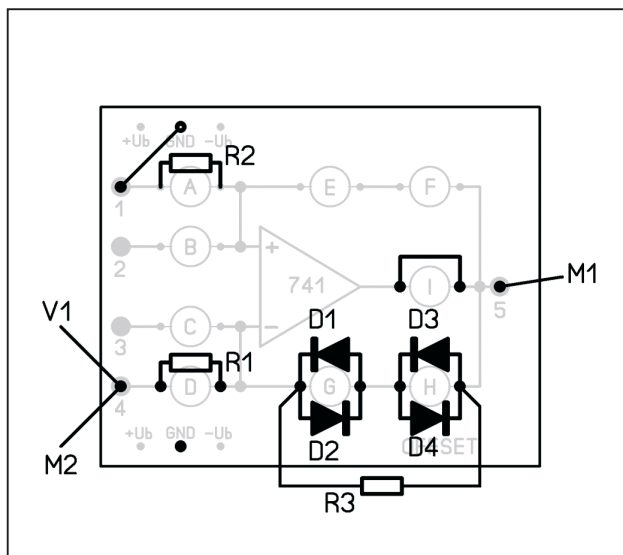
**Figuur 91:** Het schema van een op-amp met niet-lineaire terugkoppeling.

### De praktijk

Dit experiment kunt u volgens figuur 92 opbouwen op uw experimenteerprint. Op de ingang zet u een van de spanningsbronnen, geschakeld op het  $\pm 1$  V bereik. De ingang en de uitgang verbindt u met uw spanningsmeters, geschakeld op het  $\pm 1$  V bereik.

### Hoe de uitgang reageert op de ingang

U kunt nu het verband tussen in- en uitgangsspanning (transferkarakteristiek!) opmeten en in een tabel verwerken, zie figuur 93. U laat de ingangsspanning in stappen van 0,1 V stijgen en meet telkens de uitgangsspanning. De resultaten van deze metingen kunt u in een grafiek uittekenen, zie figuur 94. De horizontale as geeft de ingangsspanning, de verticale as de uitgangsspanning.

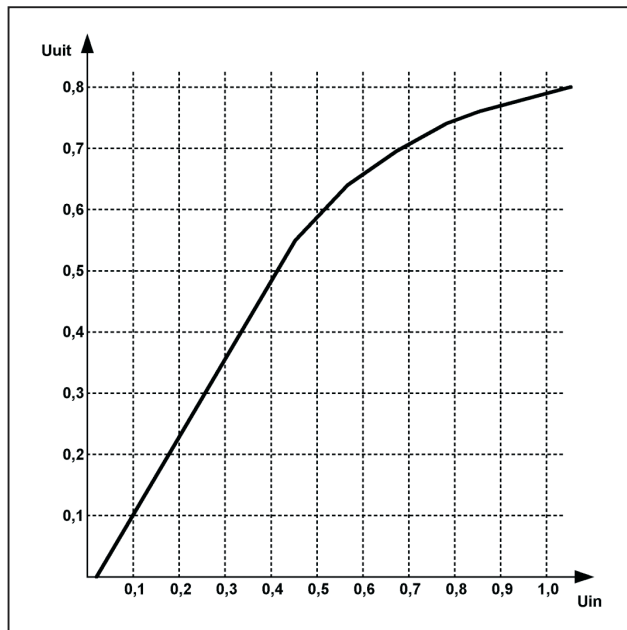


**Figuur 92:** De schakeling op onze experimenteerprint.

V <sub>in</sub>	V <sub>uit</sub>
0 V	0 V
+0,1 V	-0,1 V
+0,2 V	-0,2 V
+0,3 V	-0,3 V
+0,4 V	-0,4 V
+0,5 V	-0,48 V
+0,6 V	-0,58 V
+0,7 V	-0,65 V
+0,8 V	-0,70 V
+0,9 V	-0,72 V
+1,0 V	-0,75 V

**Figuur 93:** Het verband tussen in- en uitgangsspanning, weergegeven op een numerieke manier.

Dit verband is, zoals te verwachten was, niet-lineair. Voor kleine ingangsspanningen stijgt de uitgangsspanning lineair. Een verdubbeling van  $V_{in}$  heeft een verdubbeling van  $V_{uit}$  tot gevolg. Voor ingangsspanningen boven 0,6 V gaat dat echter niet meer op. De uitgangsspanning stijgt dan minder snel voor gelijke spanningsstijgingen aan de ingang.



**Figuur 94:** De resultaten van de tabel van figuur 93, maar nu in een grafiek weergegeven met absolute eenheden om het geheel meer op het eerste kwart van een sinus te laten lijken. In realiteit is de uitgangsspanning negatief vanwege het inverterende gedrag van de op-amp.

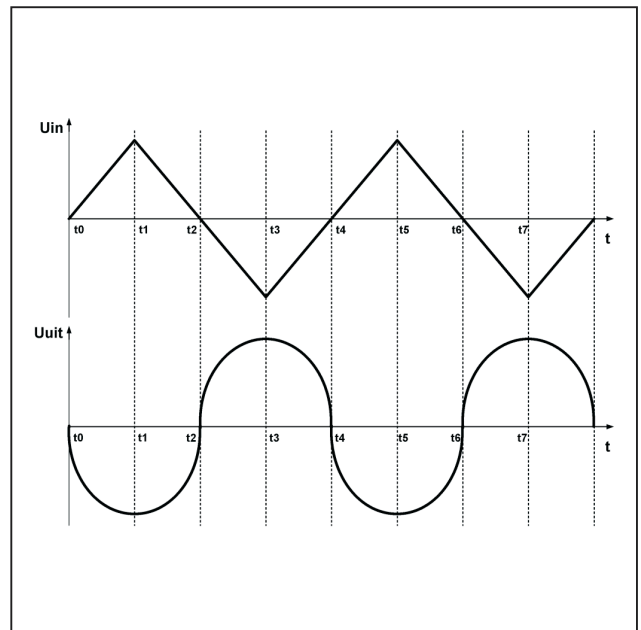
### Een pseudo-sinus

Als u uw verbeelding even aan het werk zet, doet het grafiekje van figuur 94 u ergens aan denken. Inderdaad, een sinusspanning verloopt ongeveer volgens hetzelfde patroon. Figuur 94 geeft niets anders weer dan het verloop van een kwart van de periode van een sinus.

U heeft dus een zeer eenvoudige driehoek-naar-sinus-omvormergebouwd die u in principe achter de functiegenerator uit hoofdstuk 14 kunt schakelen. Het volstaat op de ingang van de omvormer een driehoek aan te sluiten met een top-tot-top waarde van 2 V (zie figuur 95) om op de uitgang een sinus te krijgen met een top-tot-top waarde van 1,5 V.

### Hoe werkt deze schakeling?

Simpeel: voor kleine ingangsspanningen zijn de dioden in de terugkoppeling niet actief. De versterking van de schakeling wordt bepaald door de verhouding van  $R_1$  tot  $R_3$ . Beide weerstanden zijn even groot, de versterkingsfactor is 1. Als de ingangsspanning stijgt wordt de versterking van de schakeling



**Figuur 95:** Een driehoek op de ingang levert een "sinus" aan de uitgang.

niet meer alleen bepaald door de weerstandsverhouding, maar ook door de dalende weerstand van de dioden. De weerstand in de terugkoppeling daalt, de versterking wordt kleiner, de stijging van de uitgangsspanning wordt kleiner. De uitgangsspanning wordt dus "afgetopt", met als gevolg dat de driehoek wordt omgezet in iets dat op een sinus lijkt.

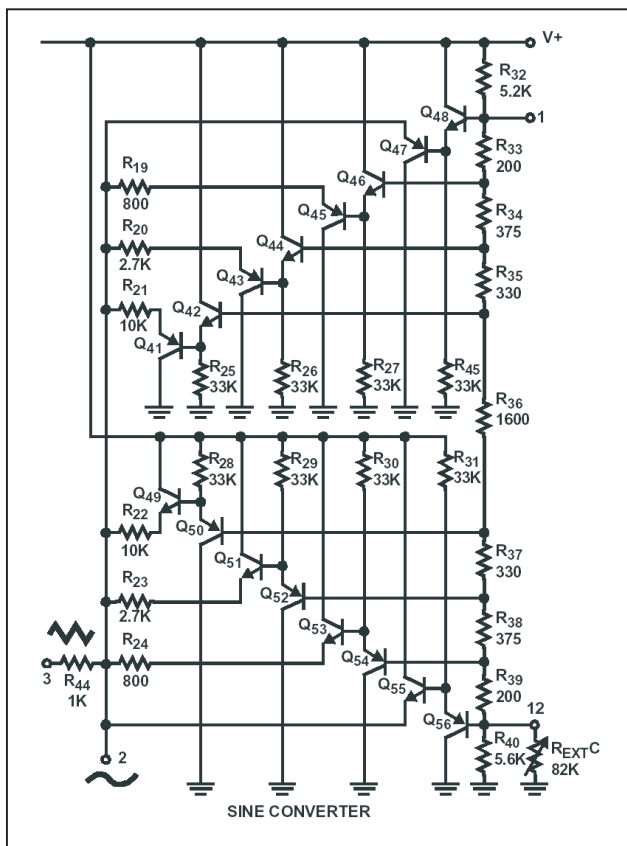
### Eenvoudig, maar met beperkingen

In de praktijk kleven er nogal wat bezwaren aan deze simpele driehoek-naar-sinus-omzetter. Het belangrijkste bezwaar is de relatief hoge vervorming. De schakeling van figuur 91 levert een sinus met minimaal 2 % vervorming en dat is veel te veel om in de praktijk bruikbaar te zijn. Een tweede bezwaar is dat de goede werking van de schakeling volledig afhankelijk is van de grootte van de driehoeksspanning op de ingang. Zou deze iets groter of iets kleiner worden, dan werkt de omzetter of niet meer, of gaat de sinusvervorming erg hoog worden.

Vandaar dat men in de praktijk veel ingewikkelder schakelingen gebruikt, die echter wel op dit principe berusten. In plaats van één terugkoppeltak met vier dioden bouwt men dan een heel netwerk op met weerstanden en soms wel tientallen dioden, die voor een zeer

nauwkeurige omzetting van driehoek in sinus zorgen. Met deze schakelingen kunt u sinus- en met een vervorming van enige tienden procent opwekken.

Om u een indruk te geven van de complexiteit van dergelijke schakelingen hebben wij de driehoek-naar-sinus omzetter in de ICL8038, een functiegenerator-IC van Intersil, in figuur 96 voorgesteld. De combinatie van weerstanden en dioden is nu vervangen door een ingewikkeld netwerk van weerstanden en transistoren, die echter dezelfde functie vervullen. Naarmate de driehoekvormige spanning aan de ingang stijgt, gaan steeds meer transistoren geleiden, waardoor de versterking van de schakeling afneemt en de driehoek vrij nauwkeurig in een sinus wordt omgezet.



**Figuur 96:** In het IC ICL8038 wordt dit principe toegepast voor het omzetten van de driehoek in een mooie sinus.

### Zélf meten

Dit experiment is een ideale basis om u te leren kleine spanningen nauwkeurig te meten en niet-lineaire grafieken te tekenen in een

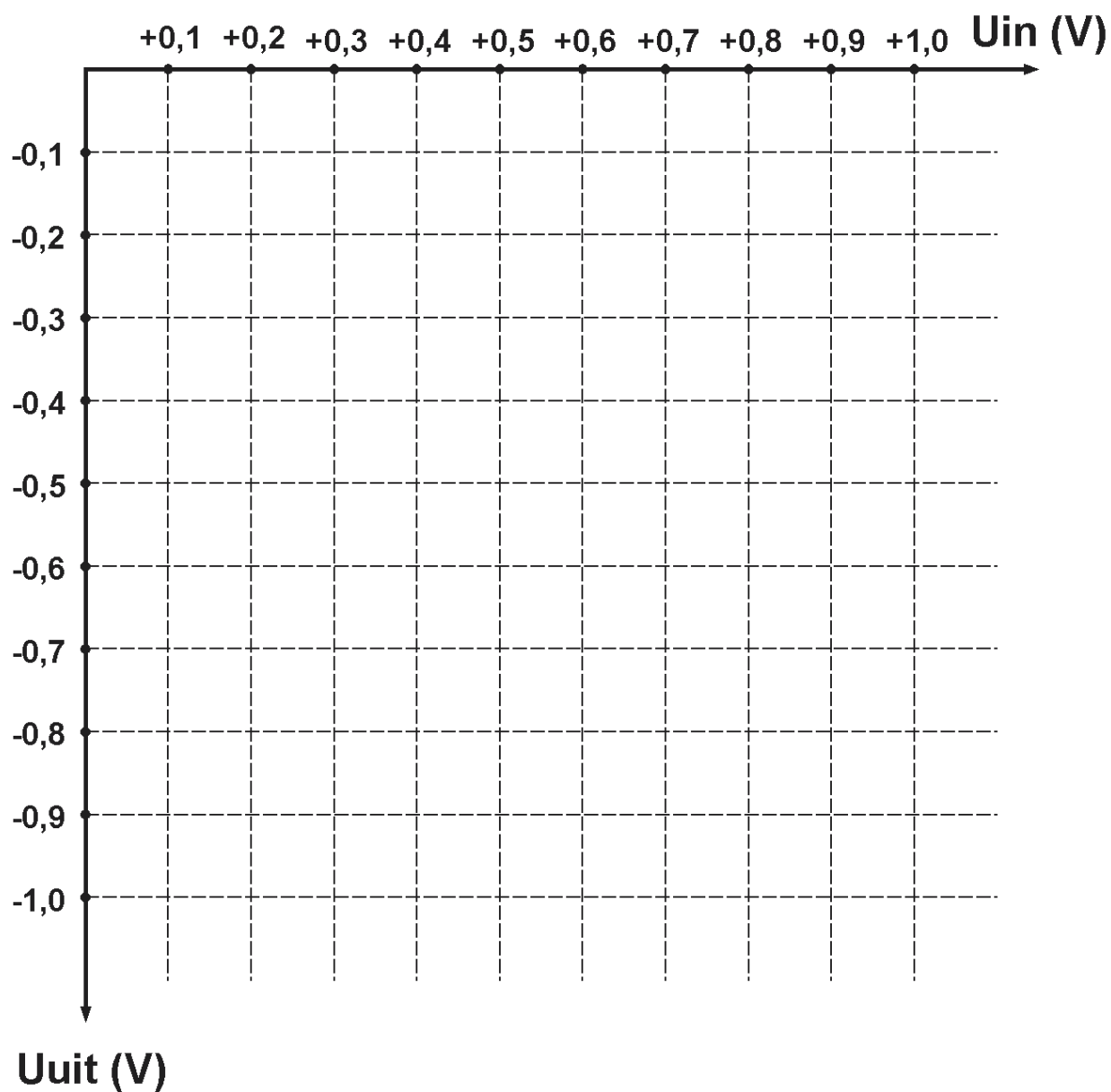
assenstelsel. In de lege grafiek op de laatste pagina kunt u het gemeten verband tussen in- en uitgangsspanning uitzetten. Het resultaat moet iets zijn dat lijkt op de grafiek van figuur 94.

Uw meetpunten liggen nu natuurlijk niet op een rechte lijn en het is misschien een probleem om die punten door middel van een vloeiende lijn met elkaar te verbinden. Daarvoor bestaan speciale sjablonen van Rotring, zie figuur 97, waarmee u dergelijke niet-lineaire grafieken keurig kunt tekenen.



**Figuur 97:** Dergelijke sjablonen zijn ideale hulpmiddelen om de punten van een niet-lineaire grafiek keurig door middel van een vloeiende lijn met elkaar te verbinden.



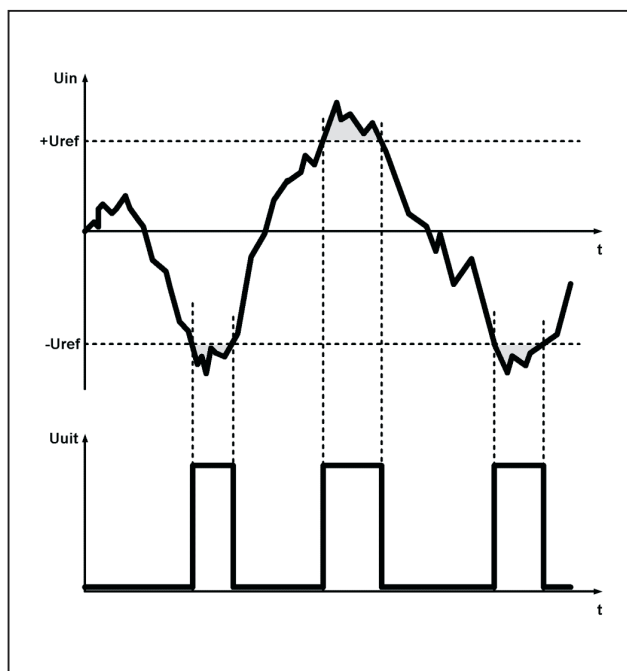
**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**

# 16 De op-amp als vensterdiscriminator

## Inleiding

Met de comparatorschakeling uit hoofdstuk 12 kunt u een spanning vergelijken met één referentie en een alarmsignaal opwekken als de spanning de drempel overschrijdt. Vaak heeft u echter behoefte aan een schakeling die in staat is te controleren of een signaal binnen twee grenzen blijft.

Kijk maar naar figuur 98. Een variërende spanning  $U_{in}$  wordt vergeleken met twee referenties  $+U_{ref}$  en  $-U_{ref}$ . Als de spanning groter wordt dan de ene referentie of kleiner dan de andere, dan moet een uitgangssignaal worden opgewekt.

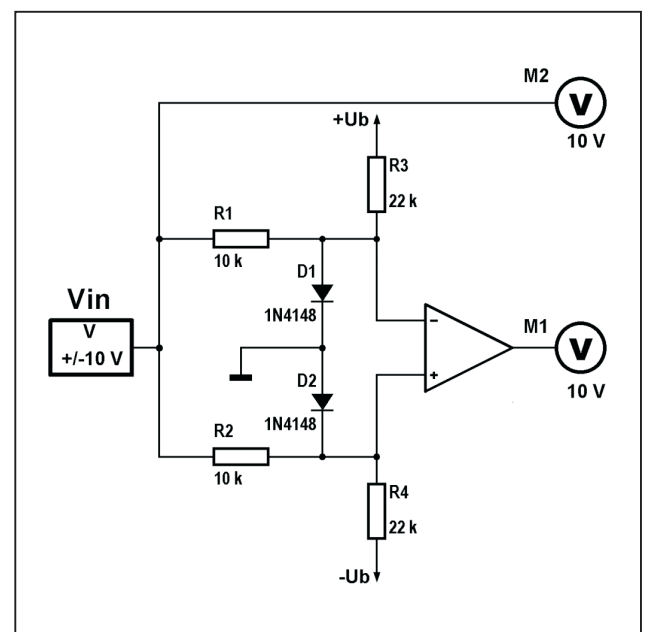


**Figuur 98:** De werking van een vensterdiscriminator.

Zo'n schakeling noemt men een vensterdiscriminator. Er zijn diverse mogelijkheden om zo'n schakeling te realiseren. De meeste maken gebruik van twee of drie operationele versterkers. Er bestaat echter een niet zo bekende schakeling, die genoegzaam met slechts één op-amp en deze schakeling gaan we in dit hoofdstuk toelichten.

## Het schema

Het schema is getekend in figuur 99. De te vergelijken ingangsspanning wordt nu aan beide ingangen van de op-amp aangeboden via de weerstanden R1 en R2. De beide ingangen worden door middel van dioden en met de voedingsspanningen verbonden weerstanden ingesteld op kleine positieve en negatieve spanningen. Over de geleidende dioden vallen spanningen van ongeveer 0,5 V. De negatieve ingang wordt ingesteld op een positieve spanning, de positieve ingang op een negatieve spanning.



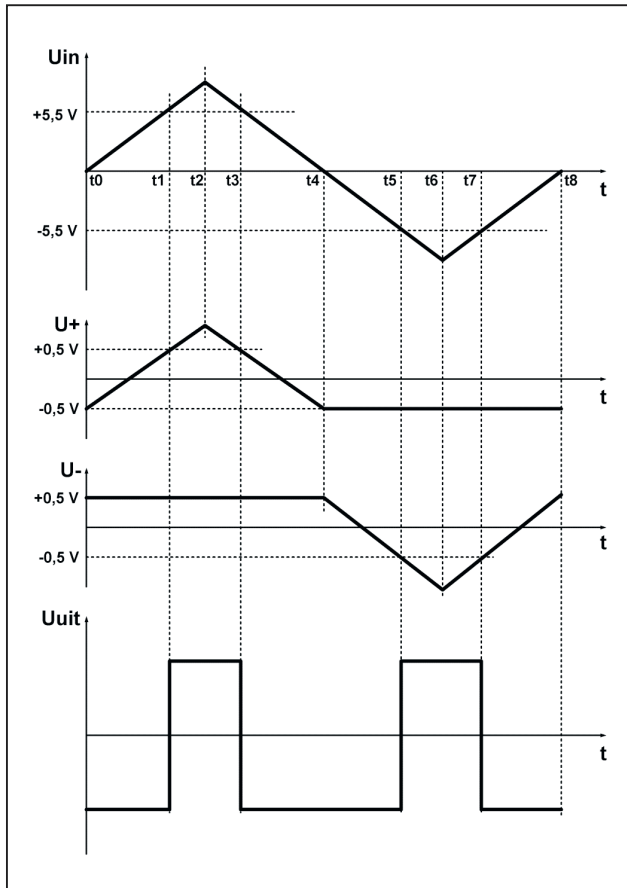
**Figuur 99:** Het prinsipeschema van een vensterdiscriminator.

## Grafische verklaring

Figuur 100 geeft het verloop van de spanningen weer.

Eerste voorbeeld. De ingangsspanning is nul volt. De uitgang van de comparator zal dan negatief zijn. De inverterende ingang van de op-amp is immers positiever dan de niet-inverterende ingang en dit spanningsverschil wordt door de op-amp tienduizenden keren versterkt.





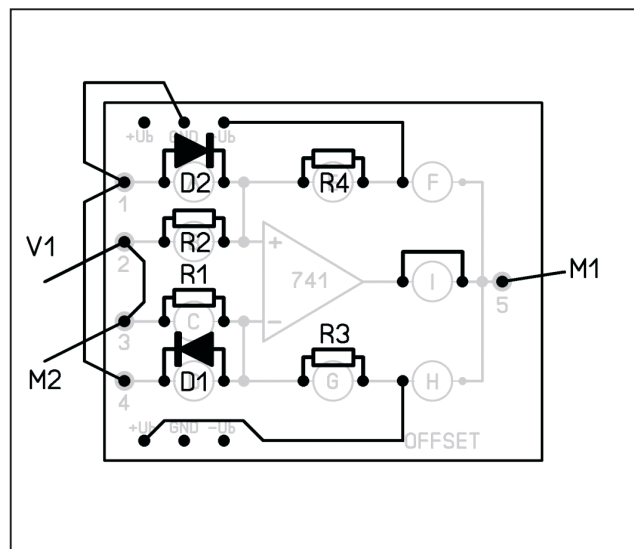
**Figuur 100:** Grafische verklaring van de werking van de schakeling.

Tweede voorbeeld. U laat deingangsspanning langzaam stijgen. Deingangsspanning is door middel van twee spanningsdelers aangesloten op de op-amp. De stijgende spanning heeft geen invloed op de negatieve ingang. De geleidende diode D1 zorgt er immers voor dat de spanning constant blijft op +0,5 V. Anders zit dit bij de positieve ingang. Deze staat ingesteld op -0,5 V. Het stijgen van deingangsspanning heeft tot gevolg dat er een stroom gaat lopen door de serieschakeling van R2 en R4, waardoor de spanning op het knooppunt langzaam toeneemt. Bij een bepaalde waarde van  $V_{in}$  wordt de spanning op de positieve ingang gelijk aan +0,5 V. De spanning op deze ingang wordt even later groter dan de diodespanning op de negatieve ingang, de comparator klapt om. De uitgang wordt positief. De grootte van deingangsspanning, waarbij dit omklappen gebeurt, wordt bepaald door de verhouding tussen R2 en R4. Ook de grootte van de voedingsspanning speelt een rol.

Conclusie: als deingangsspanning groter wordt dan +5,75 V zal de uitgang van de comparator omklappen van - $U_b$  naar + $U_b$ .

### De praktijk

U kunt uiteraard een en ander op de trainer controleren! In figuur 101 is de componentenopstelling op de experimenteerprint getekend. Als u de spanning op de ingang laat dalen zal bij  $U_{in}$  kleiner dan 5,75 V de comparator weer omschakelen naar zijn starttoestand. Omdat de schakeling symmetrisch is opgebouwd, zal het duidelijk zijn dat hetzelfde verhaal geldt voor negatieveingangsspanningen. Nu blijft de spanning op de positieve ingang constant op de -0,5 V diodespanning en gaat de spanning op de negatieve ingang langzaam dalen.



**Figuur 101:** De schakeling van de vensterdiscriminator op uw trainer.

Als deze gelijk wordt aan - 0,5 V klapt de schakeling om, de uitgang wordt positief.

### Toepassingen

Met deze schakeling kunt u bijvoorbeeld een zeer eenvoudige oversturingsindicatie ontwerpen voor een eindversterker of een mengpaneeltje. Als u de uitgang van de op-amp, via een transistor, naar een LED stuurt en u berekent de waarden van de vier weerstanden zo dat de schakeling omklapt als het signaal over de luidspreker groter wordt dan noodzakelijk voor het opwekken

van een bepaald maximaal vermogen, dan zal het LED'je gaan branden als de versterker overstuurd wordt.

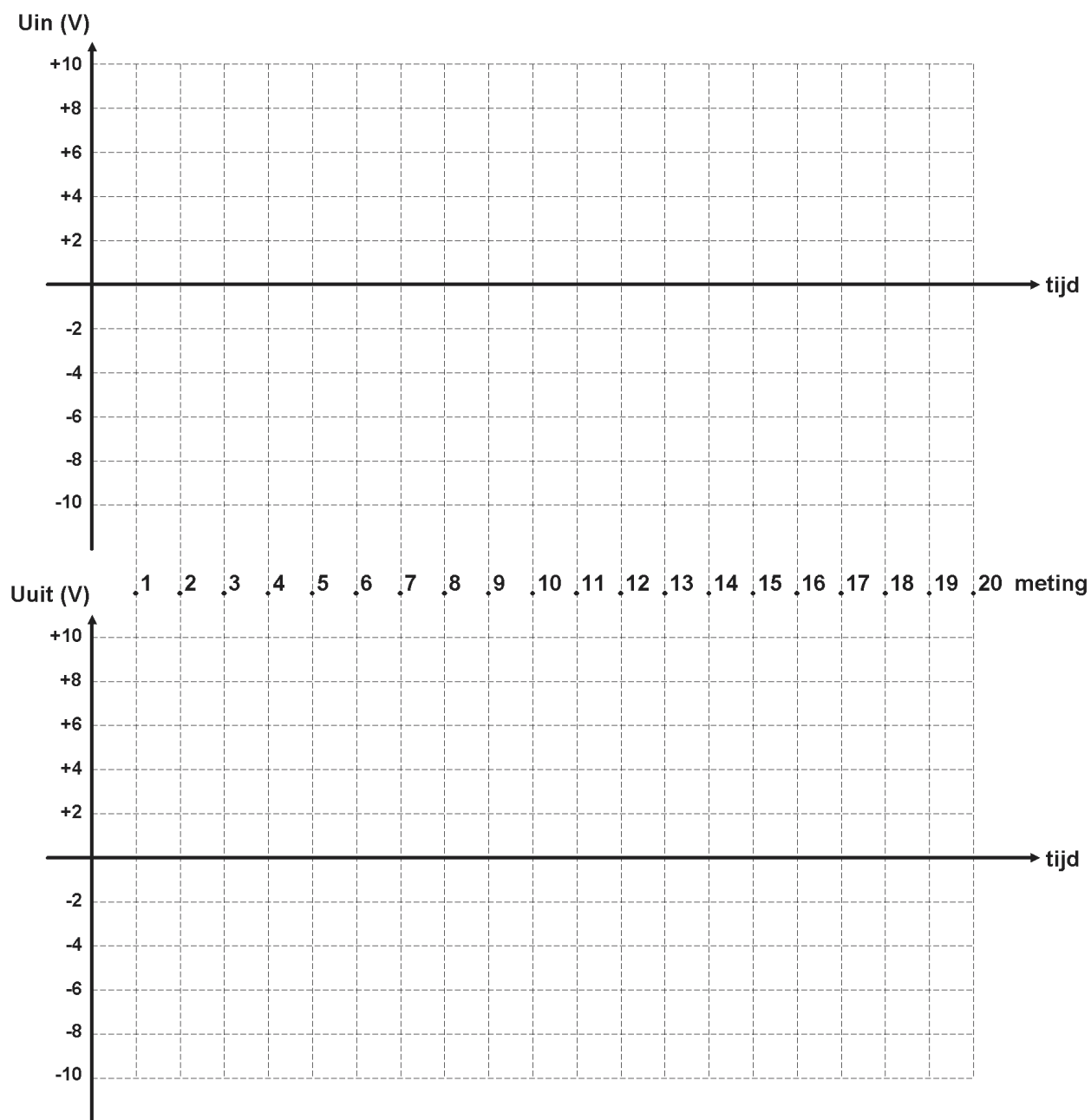
### **Zélf meten**

Uiteraard is dit weer een leuk experiment om uw meetapparatuur op los te laten. In de lege grafieken op de laatste pagina van dit hoofdstuk kunt u de in- en de uitgangsspanningen opmeten en intekenen.

Wij stellen u hier een andere grafische methode voor, die ook vaak wordt toegepast. Beide grafieken geven het verloop van de in- en de uitgangsspanning in functie van de "tijd". Nu is "tijd" hier een relatief begrip dat u kunt vertalen in "meting". U voert bijvoorbeeld "meting 1" uit door de ingangsspanning op -10 V in te stellen. U zet de gemeten in- en uitgangsspanningen in de grafieken op de stippellijn die overeen komt met "meting 1". Op deze manier kunt u, door bijvoorbeeld twintig ingangsspanningen in te stellen en die te koppelen aan de stippellijnen van "meting 1" tot en met "meting 20", de totale grafiek samenstellen.

Als u de smaak te pakken krijgt kunt u de waarde van de weerstanden veranderen en meten wat voor invloed dit heeft op de breedte en de positie van het "venster" van de vensterdiscriminator.

## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!

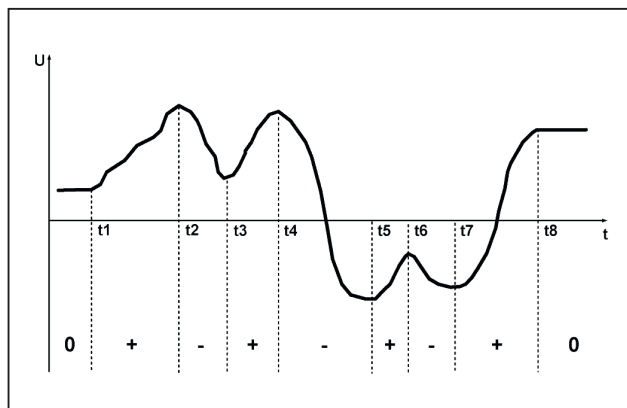


# 17 De op-amp als slope detector

## Inleiding

Het Engelse woordje “slope” staat voor “helling”. In de elektronica wordt het woordje “slope” gebruikt om aan te geven hoe een signaal van de ene waarde naar een andere waarde gaat. Het signaal kan namelijk stijgen of dalen. In het eerste geval spreekt men van een positieve helling of slope, in het tweede geval van een negatieve helling of slope.

In figuur 102 is een vrij willekeurig verlopen- de spanning getekend, een spanning die u bijvoorbeeld kunt verwachten aan de uitgang van de gelijkrichtschakeling van een dB-meter voor geluid.



**Figuur 102:** Een willekeurig signaal stijgt met een positieve slope naar een maximum en daalt nadien met een negatieve slope naar een minimum.

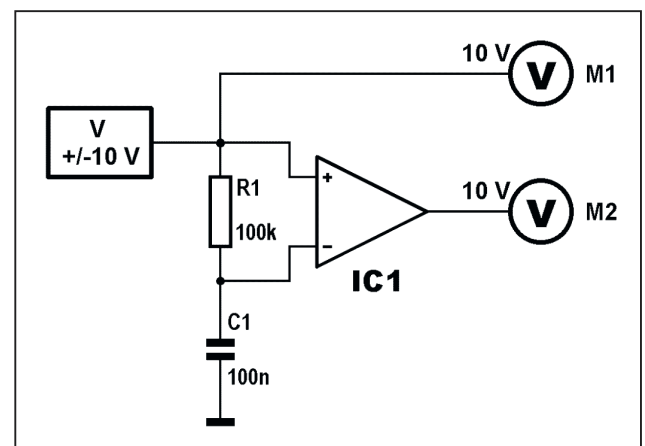
Vóór tijdstip  $t_1$  is de spanning in rust, de slope is nul. Tussen  $t_1$  en  $t_2$  stijgt het signaal naar een maximum, de slope is positief. Nadien daalt het signaal weer naar een bepaald minimum met uiteraard een negatieve slope. De overgang van een positieve naar een negatieve slope duidt dus steeds aan dat een signaal nét een maximum waarde heeft bereikt. De overgang van een negatieve naar een positieve slope vertelt u dat het signaal net uit een minimum komt.

Voor sommige schakelingen is het belangrijk te weten waar de minimale en maximale

waarden optreden. Als u een systeem verzint dat u meldt hoe de slope van het signaal verloopt, kunt u uit deze informatie afleiden wanneer het signaal een minimum of een maximum doorloopt.

## Slope detector met een op-amp

Met een op-amp kunt u vrij eenvoudig een slope detector opbouwen. Het basisschema is getekend in figuur 103 en bestaat uit niets anders dan de in hoofdstuk 12 beschreven comparator, met één weerstandje en één condensator. Hetingangssignaal wordt aangeboden aan de positieve ingang. Tussen deze ingang en zijn inverterende soortgenoot staat een weerstand geschakeld. De negatieve ingang gaat bovendien via een condensator naar de massa.

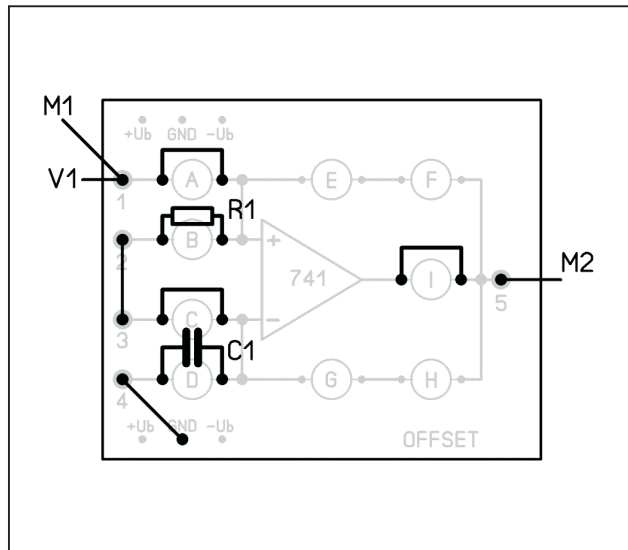


**Figuur 103:** Het basisschema van een slope detector.

## De schakeling op de trainer

U kunt dit experiment op uw universele op-amp trainer opbouwen volgens figuur 104. De positieve ingang sluit u aan op een van de gelijkspanningspotentiometers, ingesteld op een willekeurige waarde tussen +5 V en -5 V. De uitgang van de schakeling zal ofwel maximaal positief, ofwel maximaal negatief zijn. U verdraait de instelpotentiometer voor de offset-compensatie tot de uitgang net

omklapt van plus naar min of van min naar plus. Hiermee heeft u de offset gecompenseerd en kunt u het experiment starten.



**Figuur 104:** De slope detector op uw experimenteerprint.

### De schakeling onderzoeken

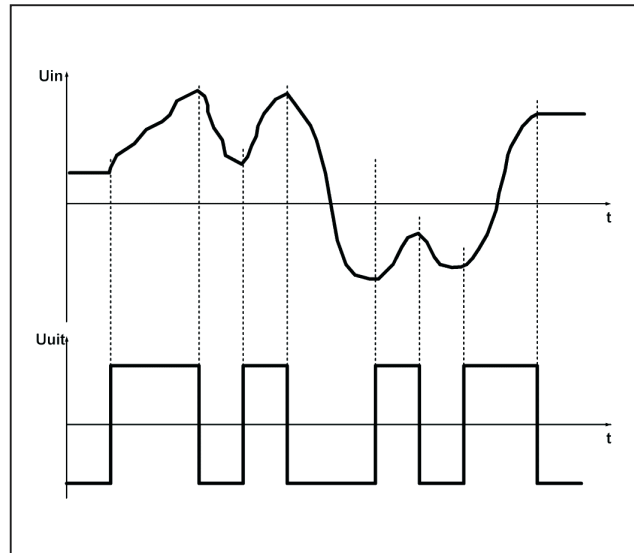
Verdraai langzaam de potentiometer van de trainer, zodat de spanning op de positieve ingang stijgt. U ziet de schakeling dadelijk reageren: de uitgang wordt positief. Laat nu de spanning weer dalen. De uitgang reageert prompt en wordt negatief.

Kortom, u heeft inderdaad een slope detector gefabriceerd! Een positieve slope levert een positief uitgangssignaal op, een negatieve slope of nul slope een negatieve uitgang.

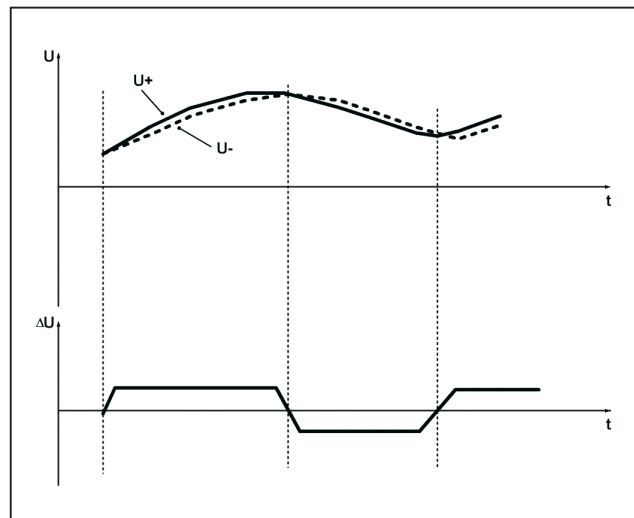
U kunt de werking van de schakeling grafisch voorstellen als getekend in figuur 105.

### Verklaring van de werking

Hoe werkt deze schakeling? Vrij eenvoudig! De positieve ingang van de op-amp is rechtstreeks gekoppeld aan het ingangssignaal en volgt de variatie van dit signaal zonder enige vertraging. De negatieve ingang is via weerstand R1 ook aangesloten aan de ingang, maar de condensator naar massa zal ervoor zorgen dat de spanning op de negatieve ingang steeds iets vertraagd is ten opzichte van de spanning op de positieve ingang. In figuur 106 is dit verschijnsel getekend. In de bovenste grafiek zijn de spanningen op de beide ingangen van de op-amp

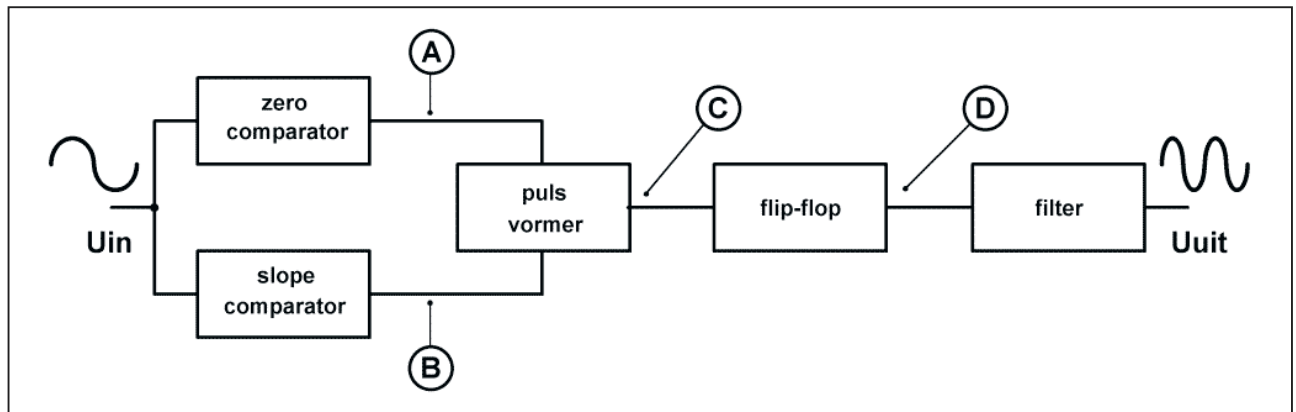


**Figuur 105:** De werking van de schakeling samengevat in een overzichtelijke grafiek.



**Figuur 106:** De werking van de schakeling berust op het kleine spanningsverschil  $\Delta U$  tussen beide ingangen, als gevolg van het vertraagd op- en ontladen van de condensator.

getekend, de positieve ingangsspanning als volle lijn, het signaal op de inverterende ingang gestippeld. Als  $U_{in}$  stijgt, dan zal er een stroom door R1 gaan vloeien die de condensator oplaadt. Zolang de ingangsspanning blijft stijgen zal er stroom door R1 blijven vloeien en zal de condensator zich opladen tot de stijgende ingangsspanning. Er is dus steeds een positief spanningsverschil tussen de positieve en de negatieve ingang. De op-amp is geschakeld als comparator en uit hoofdstuk 12 weet u dus inmiddels dat de



**Figuur 107:** De slope detector kan, binnen bepaalde grenzen, de frequentie van eeningangssignaal verdubbelen.

op-amp op dat kleine spanningsverschil reageert door het vastlopen tegen de positieve voedingsspanning.

Als deingangsspanning gaat dalen, zal er een moment komen waarop de spanningen op beide ingangen aan elkaar gelijk worden. De comparator klappt om. Nadien zal de condensator gaan ontladen, maar ook nu zal er een klein spanningsverschil ontstaan tussen beide ingangen, zij het van inverse polariteit. De negatieve ingang is iets positiever dan de niet-inverterende ingang, de uitgang van de comparator blijft negatief.

### Beperkingen van de schakeling

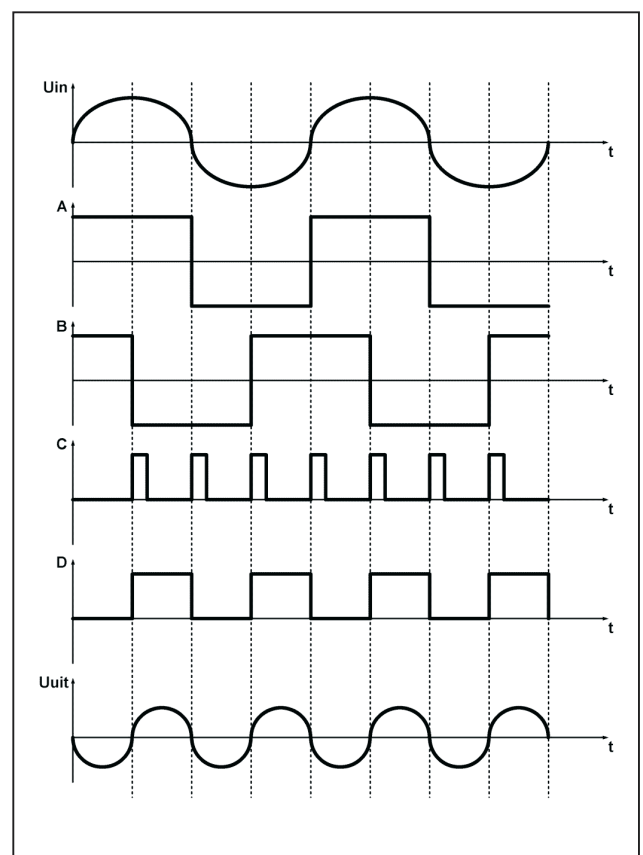
Het zal duidelijk zijn dat de vertraging tussen positieve en negatieve ingang wordt bepaald door de grootte van R1 en C1. Hoe groter beide onderdelen, hoe trager de negatieve ingang de spanningsvariatie aan de ingang volgt.

Dit simpele feit geeft dadelijk de begrenzing aan van deze schakeling. De gekozen waarden van 100 kΩ en 100 nF zijn ideaal voor het volgen van de langzame spanningsvariaties op de trainer, maar zouden niet geschikt zijn als u de schakeling wilt gebruiken bij zeer snelle ingangsspanningsvariaties.

Met andere woorden: de schakeling is frequentieselectief, voor iedere frequentieband moeten R1 en C1 andere waarden hebben.

### Praktische toepassingen

Een praktische toepassing van onze slope detector is getekend in figuur 107. U wilt de frequentie  $f_i$  van een bepaald sinusvormig



**Figuur 108:** De spanningsvormen in de schakeling van figuur 107 in functie van de tijd.

signaal  $V_{in}$  verdubbelen. Bij muziekelektronica freaks zullen nu allerlei belletjes gaan rinkelen!

Het ingangssignaal legt u aan de ingang van een slope detector (de waarden van R1 en C1 aangepast aan de frequentie van het ingangssignaal) en tegelijkertijd aan de ingang van een "normale" comparator volgens het experiment uit hoofdstuk 12. De uitgangs-



spanningen A en B van beide schakelingen kunt u aflezen uit de grafieken van figuur 108. Dat zijn twee vierkantgolven, waarvan één een kwart periode verschoven is ten opzichte van de andere. In een pulsvormer wekt u naaldpulsjes op bij iedere overgang van plus naar min en omgekeerd van een van beide blokgolven. Met deze pulsjes stuurt u vervolgens een flip-flop. Aan de uitgang van deze schakeling (een tweedeler) verschijnt een blokgolf met de dubbele frequentie van het ingangssignaal. Uit deze blok kunt u door een geschikte filtering (laagdoorlaat) weer een sinus afleiden, waarvan de frequentie het dubbele is van de frequentie van het ingangssignaal.

Niet de enige manier om de frequentie van een sinussignaal te verdubbelen, maar wel een zeer eenvoudige!

# 18 De op-amp als ideale diode

## Inleiding

Tot nu toe hebben we ons bezig gehouden met toepassingen van de op-amp als versterker, signaalgenerator, vergelijker en detector. In dit hoofdstuk start een nieuwe serie experimenten met als onderwerp gelijkrichting en alles dat hiermee te maken heeft.

Algemeen wil gelijkrichten zeggen: het omzetten van een wisselspanning in een gelijkspanning. Dat kan op verschillende manieren. Alle methoden hebben hun specifieke toepassingen, die we in de volgende experimenten zullen onderzoeken.

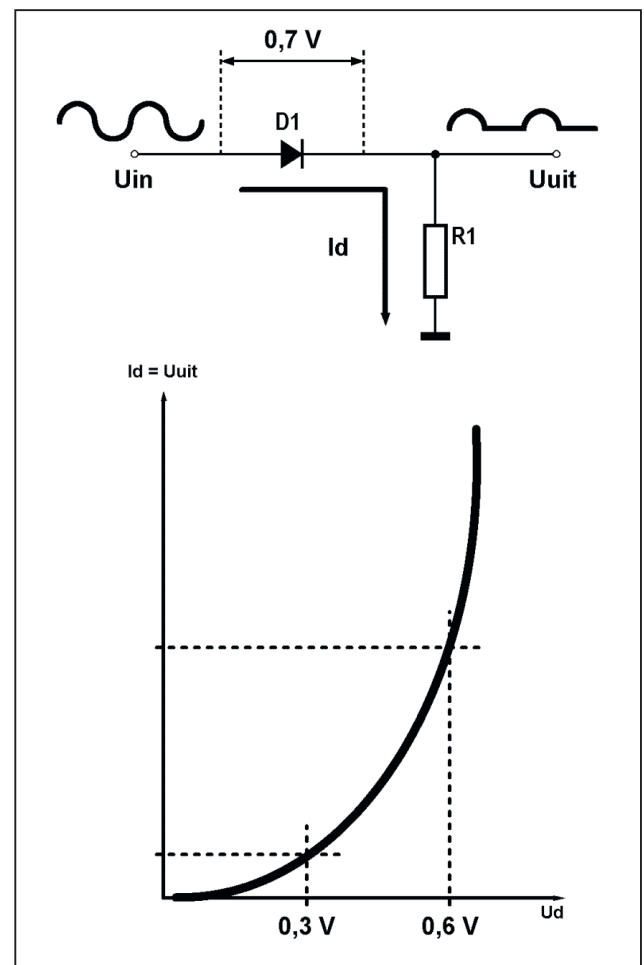
## De onvolmaakte diode

Wie gelijkrichten zegt, denkt aan een diode. Een diode is inderdaad een elektronisch component dat bij uitstek geschikt is voor het gelijkrichten van wisselspanningen. Een diode is een soort ventiel: als de kathode negatiever is dan de anode, dan geleidt het onderdeel. Als de spanning omkeren, dan spert de diode. De diode is dus een soort schakelaar, die open of dicht is al naar gelang de polariteit van de spanning over de schakelaar.

In figuur 109 is de meest simpele versie van een gelijkrichter getekend. Een gelijk te richten ingangssignaal  $U_{in}$  wordt aangeboden aan de anode van een diode. De diode vormt met de belastingsweerstand  $R1$  een seriekring tussen de ingang en de massa. Op het knooppunt van beide onderdelen wordt de uitgangsspanning afgetakt.

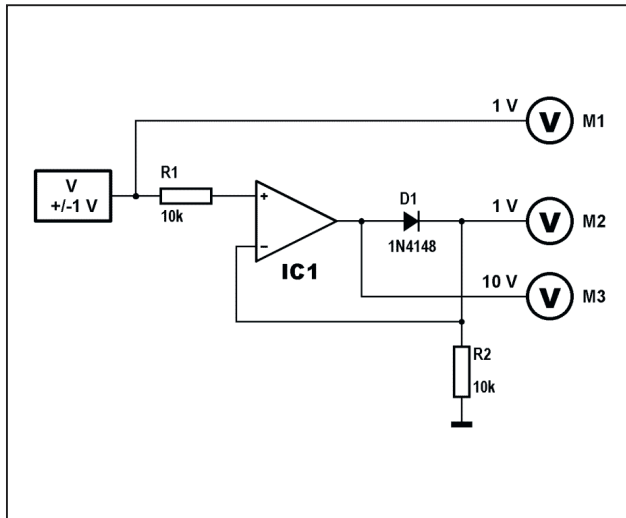
Als de ingangsspanning positief is geleidt het onderdeel (anode positief ten opzichte van kathode), er vloeit een stroom  $I$  door de kring. Deze stroom bouwt over  $R1$  een spanning op, de uitgangsspanning van de gelijkrichter. Als de ingangsspanning negatief wordt spert de diode. Er vloeit geen stroom, over  $R1$  ontstaat geen spanning, de uitgangsspanning is nul. Alleen de positieve gedeelten van de ingang verschijnen op de uitgang.

Een ideaal systeem, zo te zien. Echter, een diode is alles behalve een ideale schakelaar. In hoofdstuk 15 heeft u de stroom/spanning-karakteristiek van een diode opgemeten en geconstateerd dat deze niet-lineair is.



**Figuur 109:** De diode als gelijkrichter, uitstekend bruikbaar voor het gelijkrichten van grote spanningen.

Ook voor kleine positieve spanningen is er in feite van echt geleiden geen sprake. De diode heeft een zeer hoge inwendige weerstand en deze weerstand vormt met  $R1$  een spanningsdeler. De  $R_i$  van de diode is veel groter dan  $R1$ , zodoende verschijnt er nauwelijks iets van de kleine positieve ingangsspanning aan de uitgang.



**Figuur 110:** De op-amp, geschakeld als ideale diode.

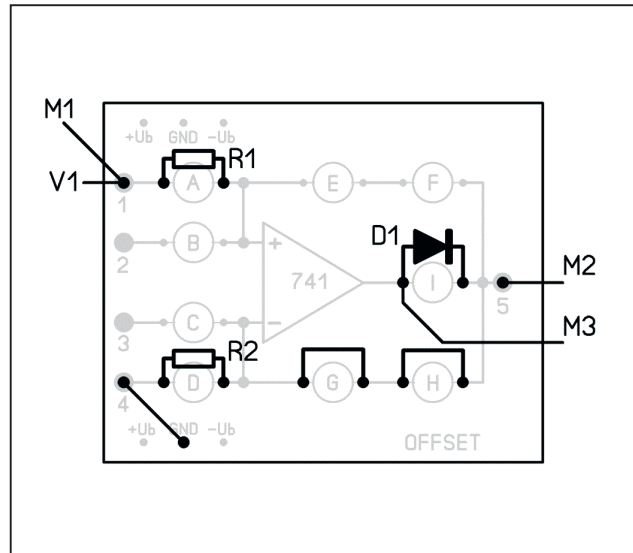
Als de ingangsspanning toeneemt gaat de  $R_i$  van de diode dalen. Eerst bij een spanning van ongeveer 1 V kan men spreken dat de uitgang recht evenredig is met de ingang. Bovendien valt er over een geleidende diode een spanning van ongeveer 0,7 V. Er kan dus nooit sprake zijn dat u de ingangsspanning ongeschonden aan de uitgang terugvindt.

Voor gelijkricht toepassingen in voedingen is een diode ideaal. De gelijk te richten spanningen zijn groot, de spanningsval over de diode doet het rendement van de gelijkrichter weliswaar iets dalen, maar dat nemen we voor lief.

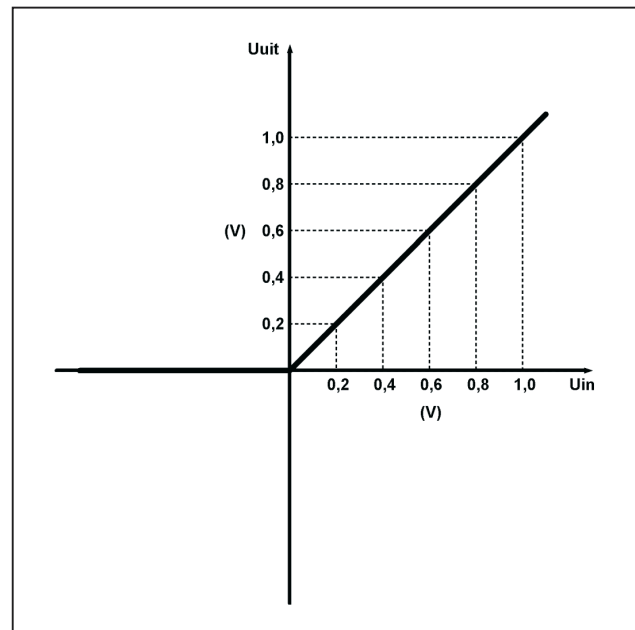
Anders wordt het als u bijvoorbeeld de uitgangsspanning van een laagfrequent voorversterker (grootte orde 100 mV) wilt gelijkrichten voor het sturen van een dB-meter of een ruisonderdrukker. Dan kunt u met het schema van figuur 109 niets beginnen.

### De op-amp als ideale diode

Dan maar een op-amp, duivel doet al, redder in alle nood, ingeschakeld! Het principiële schema van een ideale diode is getekend in figuur 110 en u kunt dat snel opbouwen op de trainer volgens figuur 111. Voor het eerst wordt de verbinding I op de trainer niet door een draadbruggetje opgevuld. Aan de ingang biedt u spanningen tussen +1 V en -1 V aan. U gaat natuurlijk meten wat u van deze ingangsspanning op de uitgang terugvindt.



**Figuur 111:** Het schema van figuur 110 op uw experimenteerprint.



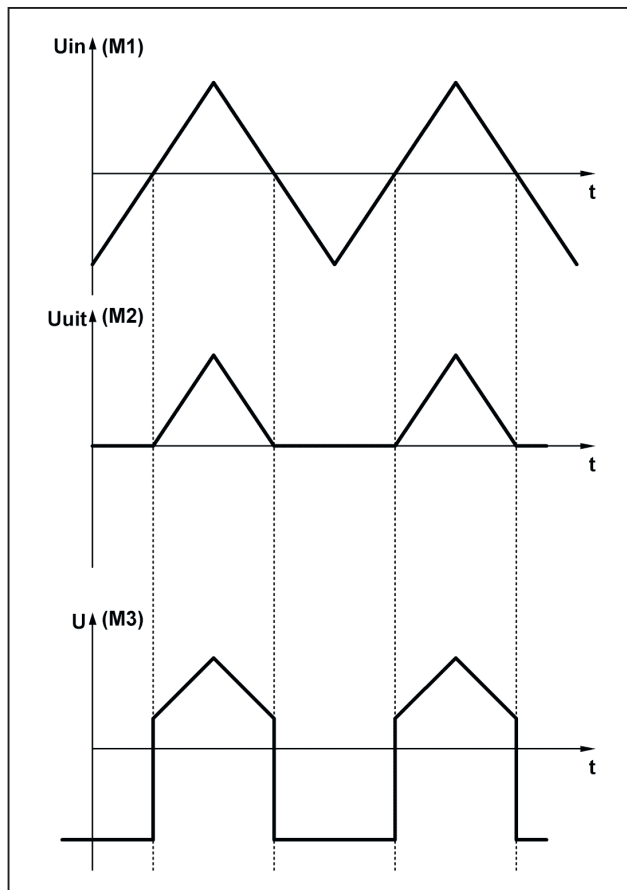
**Figuur 112:** Uit de metingen kunt u deze grafiek afleiden.

### Meetresultaten

Figuur 112 geeft het resultaat. Als u de ingangsspanning in stappen van 0,1 V laat stijgen van -1 V tot +1 V, dan stelt u vast dat er voor negatieve ingangen geen uitgangsspanning verschijnt en voor positieve ingangsspanningen dezelfde grootte aan de uitgang wordt gemeten als op de ingang. De ideale diode is hiermee een feit! Geen uitgang voor negatieve ingangsspanningen, volledige doorkoppeling (tot op de millivolt nauwkeurig) voor positieve ingangen!

### Een raar verschijnsel

Ondertussen heeft u waarschijnlijk wél een raar verschijnsel vastgesteld. Op meter M3, die de uitgangsspanning van de op-amp meet, ziet u opeens een spanningsprong naar -10 V optreden als de ingangsspanning negatief wordt, zie de grafieken van figuur 113.



**Figuur 113:** De spanningen op de diverse punten van de schakeling grafisch voorgesteld.

Hoe dat komt volgt uit de verklaring van de werking van de schakeling. Een positieve ingangsspanning zorgt voor een positieve spanning op de niet-inverterende ingang van de op-amp. De uitgang wordt dus ook positief, de anode van D1 wordt positief ten opzichte van de kathode, de diode geleidt. De negatieve ingang van de op-amp is verbonden met de kathode. De op-amp zal, zoals steeds, het spanningsverschil tussen beide ingangen weggeregelen. Als de positieve ingang op +2 V staat zal ook de negatieve ingang dat potentiaal opzoeken. De uitgang

volgt de ingang, de op-amp werkt in feite als buffer.

Stel een negatieve ingangsspanning in. De positieve ingang wordt negatief, de uitgang van de op-amp volgt. De diode gaat nu echter sperren. De uitgangsspanning van de schakeling blijft nul. Maar de niet-geleidende diode verbreekt de terugkoppeling tussen uitgang en inverterende ingang. De op-amp staat dan als comparator geschakeld. De kleine negatieve spanning op de positieve ingang wordt duizenden malen versterkt en de uitgang van de op-amp loopt vast tegen de negatieve voeding.

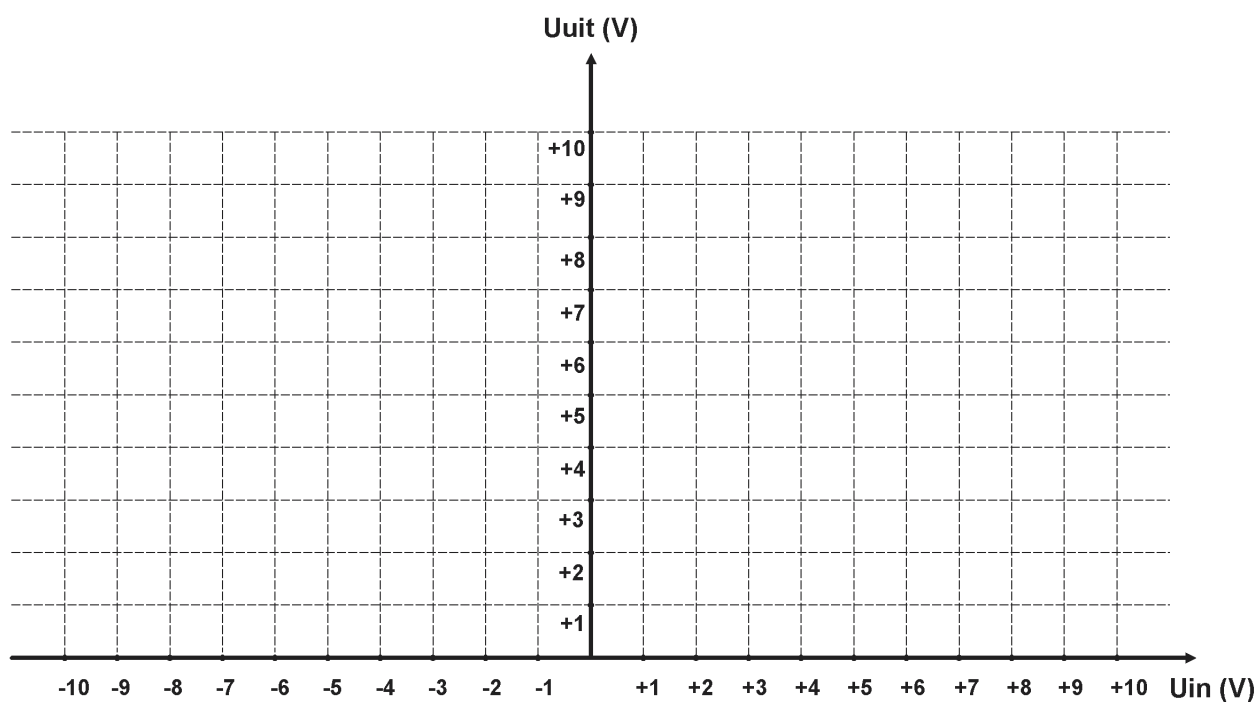
### In frequentie beperkt

Deze forse spanningsprongen op de uitgang van de op-amp hebben tot gevolg dat het frequentiebereik van deze ideale diode nogal beperkt is. Immers, een op-amp schakelt niet oneindig snel van -12 V naar +1 V, dat duurt een tijd. Als u dus een steeds hogere frequentie aan de ingang van deze schakeling aanlegt, dan zal bij een bepaalde frequentie de spanning op de uitgang van de op-amp volledig in de knoop geraken. De op-amp is dan niet meer in staat zijn uitgang in de beperkte tijd die ter beschikking staat van de hoge negatieve waarde terug te schakelen naar de kleine positieve waarde. De schakeling houdt het dan voor gezien en werkt niet meer. In de volgende hoofdstukken zullen wij echter schakelingen aan u voorstellen, die dit nadeel niet hebben.

### Zélf aan de slag

In figuur 112 hebben wij het verband tussen de in- en de uitgangsspanning getekend. Uiteraard wilt u, als nieuwsgierig meettechnicus, deze grafiek op waarheidsgehalte onderzoeken door de voorgestelde metingen uit te voeren en in te tekenen in de lege grafiek op de laatste pagina van dit hoofdstuk.

## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!



## 19 De op-amp als dubbelfazige gelijkrichter

### Inleiding

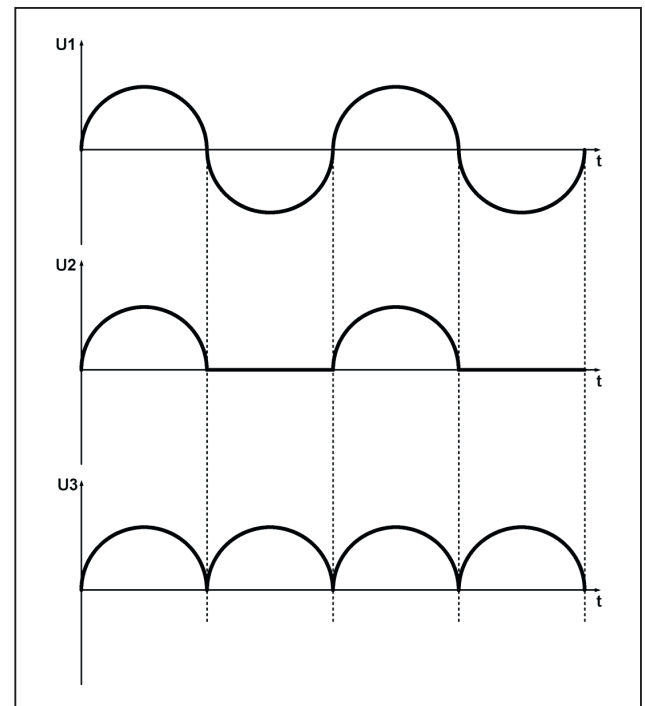
De ideale diode uit hoofdstuk 18 laat de positieve helften van de aangeboden wisselspanning door en spert de negatieve delen. Dat is een niet erg economische manier van werken en vandaar dat men gelijkrichters heeft ontworpen die zowel de positieve als de negatieve helft van hetingangssignaal omzetten. Meestal noemt men dit soort gelijkrichters, welbekend uit voedingsschakelingen, “dubbelfazige” gelijkrichters. Een verkeerde naam, omdat het woord “fase” iets heel anders aanduidt dan een van de helften van een wisselspanningssignaal. Eigenlijk zouden we moeten praten over een “volle periode” gelijkrichter. Maar, de naam dubbelfazig is zó ingeburgerd, dat wij die ook maar blijven gebruiken.

### Zeer interessant voor kleine signalen

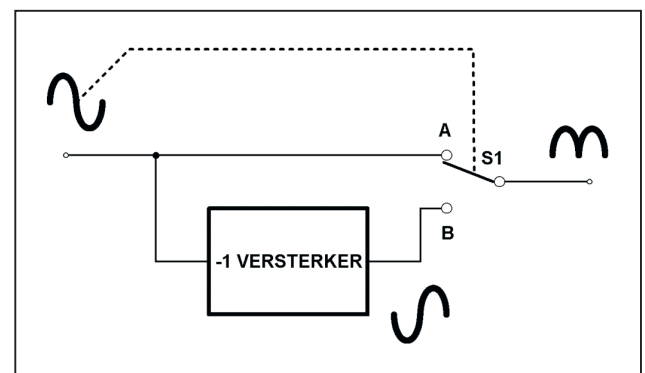
Ook bij het gelijkrichten van kleine signalen kunt u beter beide helften van hetingangssignaal verwerken. Figuur 114 geeft het onderscheid tussen de uitgangsspanning van de ideale diode uit het vorige hoofdstuk ( $U_2$ ) en de uitgangsspanning van de in dit hoofdstuk behandelde schakeling ( $U_3$ ). Het principe van de schakeling is getekend in figuur 115. Een elektronische omschakelaar schakelt de uitgang ofwel rechtstreeks aan de ingangsspanning, ofwel aan de uitgang van een inverterende versterker met versterkingsfactor van exact  $-1$ . De schakeling klapt om bij de nuldoorgang van de ingangsspanning. Voor het positieve deel van hetingangssignaal staat de schakelaar in stand A. Hetingangssignaal verschijnt rechtstreeks aan de uitgang.

Bij een negatiefingangssignaal klapt de schakelaar om naar stand B en wordt de uitgang van de omkeerversterker verbonden met de uitgang. Deze heeft er voor gezorgd dat het negatieveingangssignaal is omgezet in een even groot, maar positief variërend

signaal (zie de bespreking van de omkeerversterker in hoofdstuk 6).



**Figuur 114:** Een vergelijking tussen de uitgangsspanning van een halve periode gelijkrichter en een volle periode gelijkrichter.

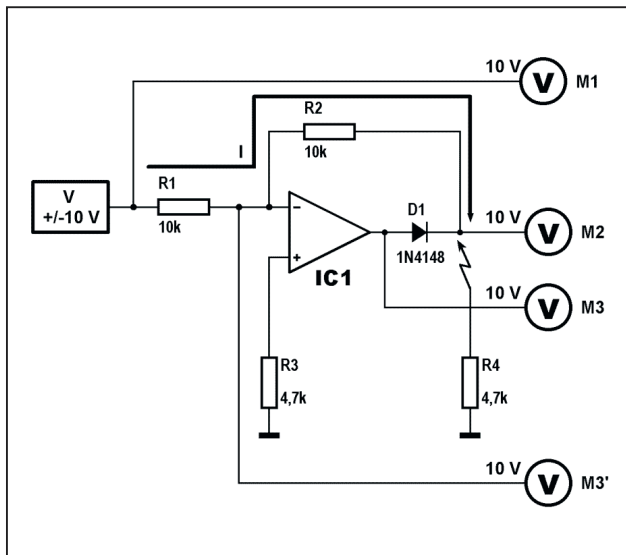


**Figuur 115:** Het principe van de werking van de schakeling.

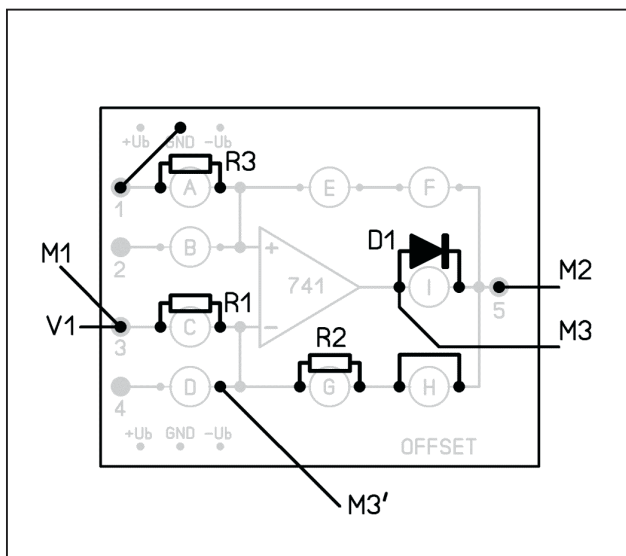
### Het schema op uw experimenteerprint

Het praktisch schema is getekend in figuur 116. U herkent de basisopzet van een omkeerversterker: weerstand  $R_1$  tussen de in-





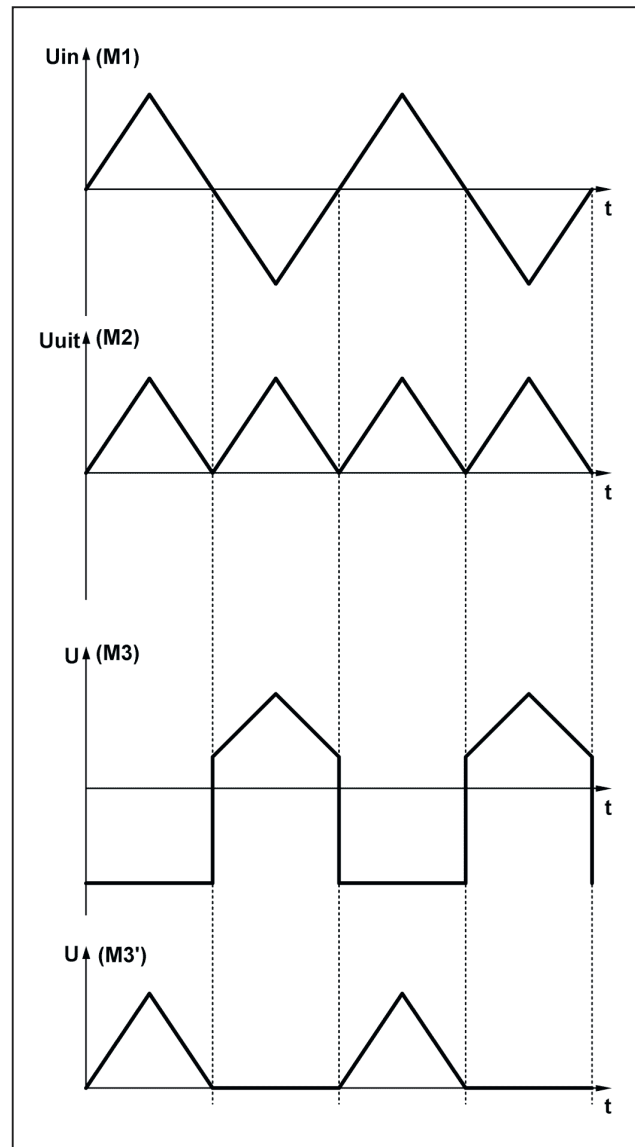
**Figuur 116:** Het schema van de dubbelfazige gelijkrichter.



**Figuur 117:** Het schema op uw experimenteerprint.

gang van de schakeling en de inverterende ingang van de op-amp, even grote weerstand tussen de uitgang en de genoemde ingang. Alleen staat er nu een extra diode tussen de op-amp uitgang en uitgang van de schakeling. Het zal duidelijk zijn dat deze diode dient als elektronisch omschakelaar, die ofwel de ingang rechtstreeks verbindt met de uitgang, ofwel de omkeerversterker tussenschakelt.

In figuur 117 is de noodzakelijke bedrading op uw experimenteerprint getekend. Ondertussen weet u natuurlijk hoe u de schakeling kunt testen: de ingangsspanning stapsgewijs



**Figuur 118:** De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

instellen tussen bijvoorbeeld -5 V en +5 V, de resultaten op de drie meters aflezen en het geheel in een tabel en/of grafiek samenvatten.

### Even een opmerking

In de tekening van figuur 116 en ook in de grafieken van figuur 118 is een meter M3' opgevoerd. U heeft maar drie meters op uw training, vandaar dat het de bedoeling is bij het experimenteren meter M3 eerst met de uitgang van de op-amp te verbinden en nadien met de inverterende ingang en voor beide gevallen het spanningsverloop op te meten voor een en dezelfde ingangsspanningsvariatie.

**De werking van de schakeling**

De werking van de schakeling wordt besproken aan de hand van de grafieken van figuur 118. Stel dat u een positieve spanning aan de ingang legt. Deze spanning gaat via R1 naar de inverterende ingang van de op-amp. De positieve ingang ligt aan massa, de op-amp zal het spanningsverschil tussen beide ingangen versterken. Kortom, de uitgang wordt negatief. Deze negatieve spanning kan echter nergens naar toe. De diode wordt gesperd (anode negatief) en de uitgang zal de uitgangsspanning van de op-amp niet overnemen. Een en ander heeft tot gevolg dat de op-amp in open-lus werkt, de uitgang wordt maximaal negatief. Bovendien dringt de positieve spanning op de ingang via weerstand R2 door naar de uitgang. De uitgang wordt positief.

Als u een negatieve spanning aanlegt aan de ingang van het systeem, dan zal de inverterende ingang negatief worden. De uitgang van de op-amp wordt bijgevolg positief en de diode gaat geleiden. De terugkoppelweerstand R2 zorgt er nu voor dat de spanning op de negatieve ingang gelijk wordt aan de spanning op de positieve ingang (nul volt). De schakeling werkt nu als gewone omkeerversterker, de uitgangsspanning is absoluut even groot als de ingangsspanning, maar met tegengestelde polariteit. Kortom, ook nu gaat de uitgang positief worden.

De volle periode gelijkrichting is een feit!

**Opmerkingen**

Deze schakeling is erg eenvoudig en toch ziet u haar niet vaak in een praktische schakeling. Dat komt door een erg vervelende eigenschap. Zoals reeds geschreven zal de diode de op-amp uitschakelen voor positieve ingangsspanningen. Er staan dan twee weerstanden R1 en R2 tussen de in- en de uitgang geschakeld. Wilt u een precisie-gelijkrichter opbouwen, dan mag er over deze weerstanden geen spanning vallen. Dan zal de uitgangsspanning kleiner zijn dan de ingangsspanning en dat is zeer zeker niet de bedoeling. De gelijkrichter wordt echter steeds belast door een volgende schakeling, die een bepaalde ingangsweerstand heeft.

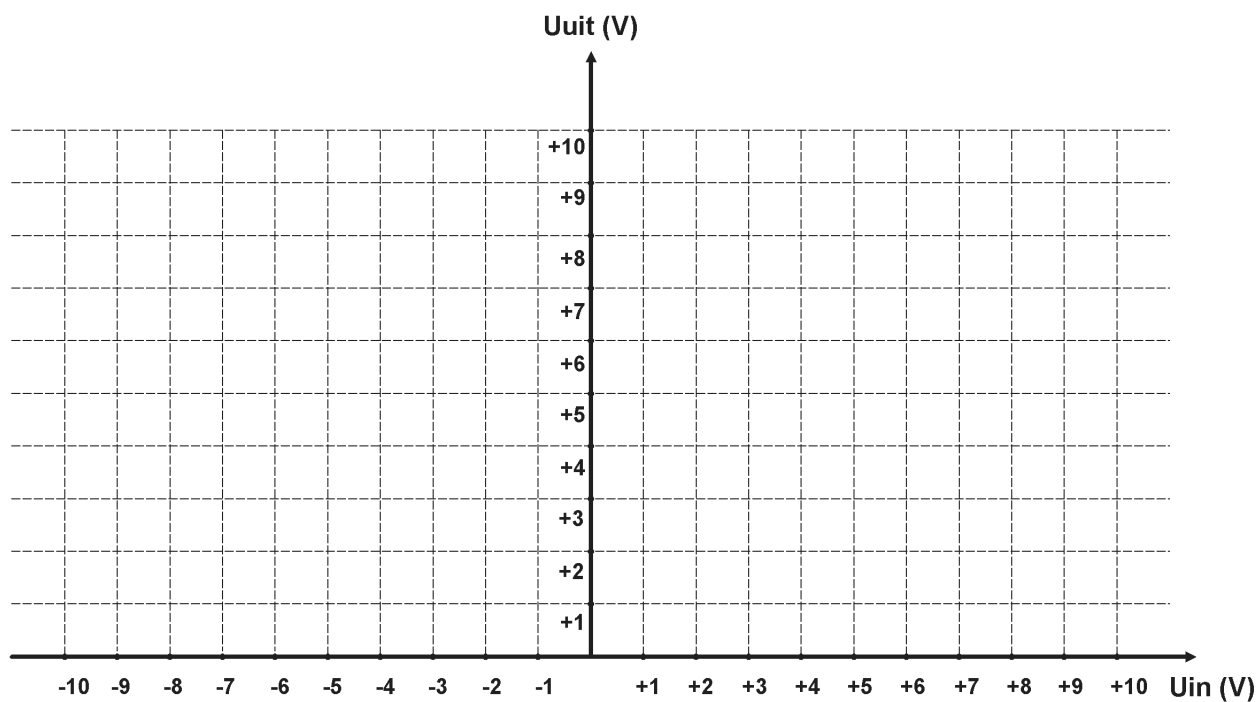
Als gevolg van deze belasting gaat er een stroom  $I$  door de twee weerstanden vloeien, met als gevolg dat een deel van de ingangsspanning als spanningsval over R1 en R2 blijft staan. Dat kunt u simuleren door een weerstandje R4 aan te sluiten tussen uitgang en massa, zie figuur 116. U zult dan zien dat de uitgang varieert bij een positief ingangssignaal. Dan, immers, kan de uitgeschakelde op-amp met zijn zeer lage uitgangsweerstand de belasting niet opvangen.

Om deze reden zult u de dubbelfazige gelijkrichter steeds volgens een iets ingewikkelder schema terug vinden.

**Zélf meten**

Het is interessant de meetresultaten van deze schakeling te vergelijken met deze van de ideale diode uit hoofdstuk 18. Op de laatste pagina treft u weer een lege grafiek aan, waarin u uw meetresultaten kunt verwerken.

## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!



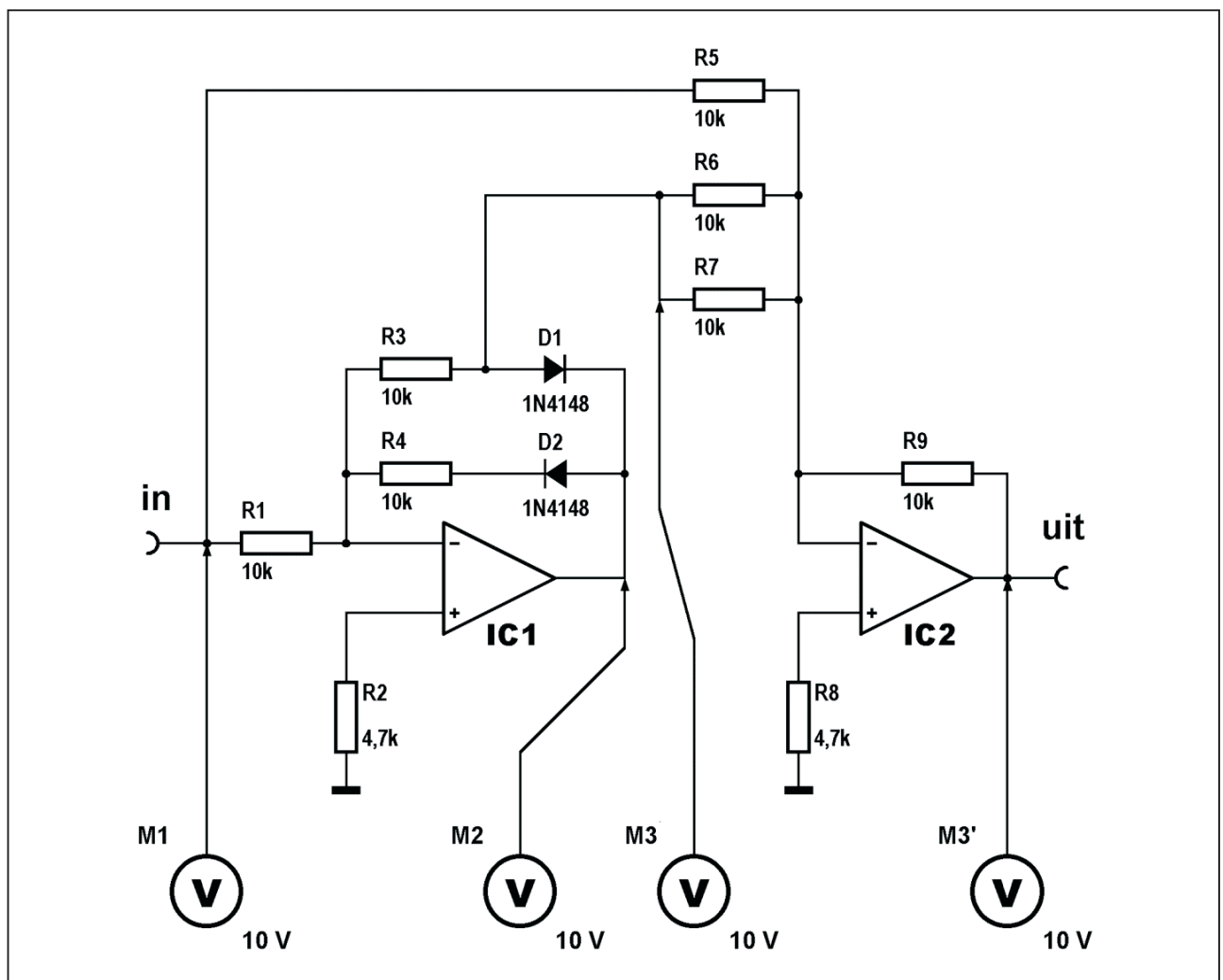
## 20 De op-amp als nauwkeurige gelijkrichter

### Inleiding

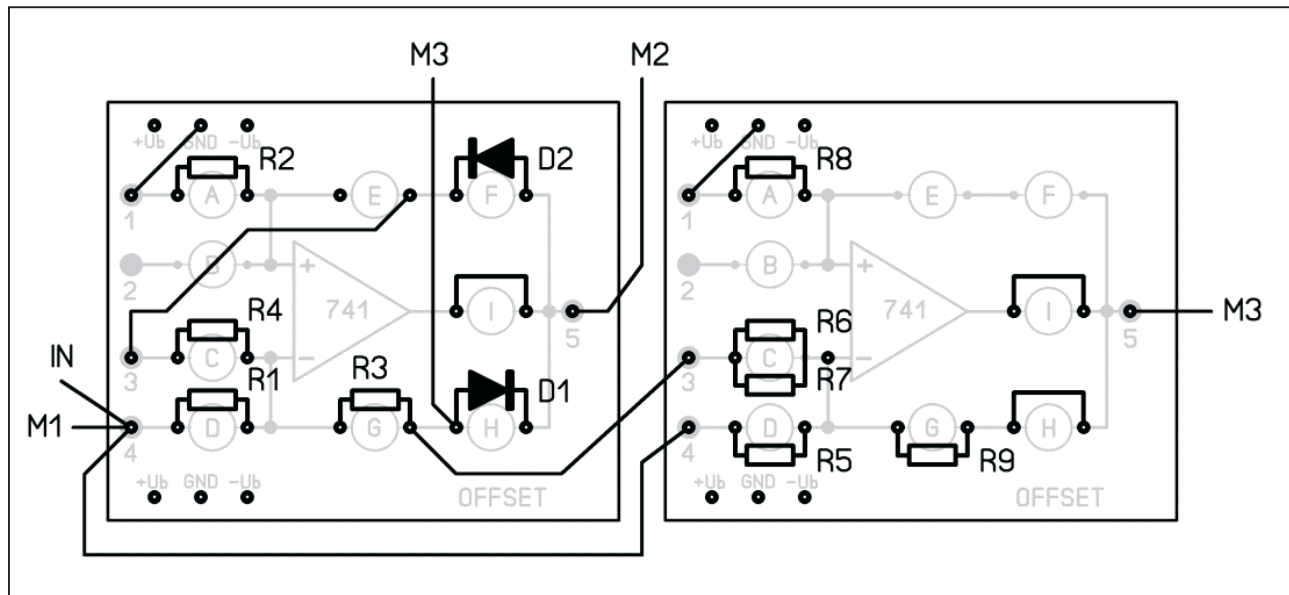
De “volle periode” gelijkrichter uit hoofdstuk 19 heeft nog een ander nadeel, dat u weliswaar niet op de trainer kunt opmerken, maar dat heel vervelend is bij praktische schakelingen. Zoals we gezien hebben, werkt de op-amp gedurende een halve periode van hetingangssignaal in open lus. De uitgangsspanning loopt dan vast tegen de voedingspanning. Na de nuldoorgang van de ingangsspanning gaat de op-amp onmiddellijk hetingangssignaal volgen.

In dat “onmiddellijk” zit nu net de moeilijkheid. Niets in de elektronica gaat traagheidsloos,

dus ook niet het omschakelen van een op-amp uitgang van een forse -10 V naar + 0,5 V. Dat kost een bepaalde tijd, bepaald door de eigenschappen van de gebruikte op-amp. Voor lage frequenties van hetingangssignaal is dat geen probleem. Het omschakelen neemt dan een verwaarloosbaar tijdsinterval in beslag, slechts enige procenten van de totale periodeduur. Stijgt de frequentie van hetingangssignaal, dan neemt het procentuele aandeel van het omschakelen van open-lus naar gesloten-lus in de totale duur van één periode toe en valt niet meer te verwaarlozen.



**Figuur 119:** Het schema van de nauwkeurige gelijkrichter rond twee op-amps.

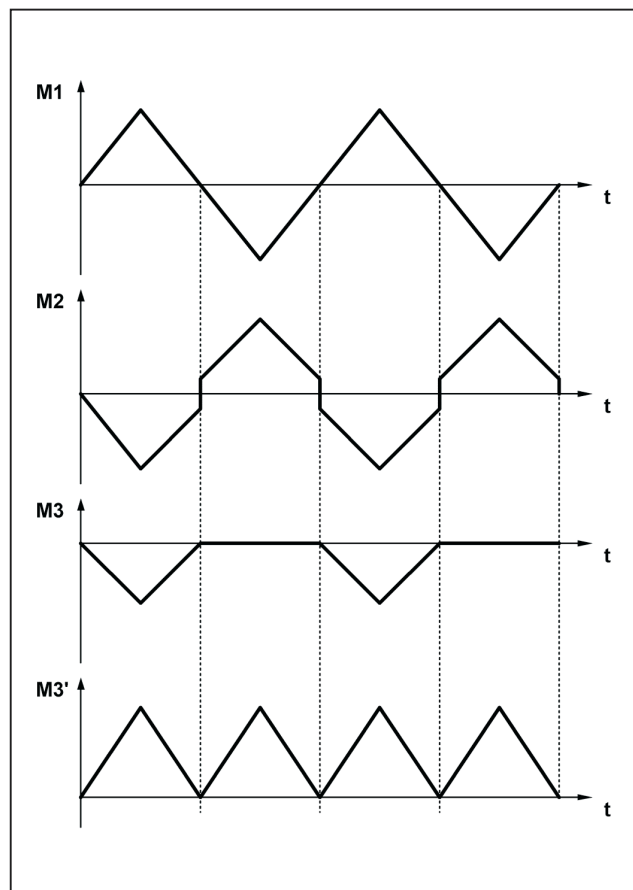


**Figuur 120:** De schakeling op uw experimenteerprinten.

De gelijkrichter gaat niet meer goed werken. Vandaar dat men heeft gezocht naar een schakeling, waarbij de op-amp nooit in open lus werkt en die bovendien zonder beïnvloeding van de nauwkeurigheid kan worden belast. De in dit hoofdstuk behandelde volle periode gelijkrichter maakt gebruik van twee op-amp's en is een zeer nauwkeurige wisselaar gelijkspanningsomzetter. Zo nauwkeurig, dat u deze schakeling ook kunt gebruiken in het gelijkrichterdeel van digitale universele meters, die de spanning aan de ingang meten met een nauwkeurigheid van enige tienden procent en dit over een breed frequentiegebied!

### Het schema van de schakeling

Het schema van de schakeling is getekend in figuur 119. Rond op-amp IC1 herkent u voor een deel de vorige schakeling. R1, R3 en D1 vormen de reeds behandelde schakeling, die zorgt voor het omzetten van de positieve halve perioden in negatieve uitgangssignalen. Het in open-lus werken van de op-amp wordt vermeden door het toevoegen van een extra terugkoppelkring R4 - D2. Als de ingangsspanning negatief wordt, dan zal D1 weliswaar gaan sperren, maar D2 gaat geleiden, waardoor er toch een terugkoppeling ontstaat tussen uit- en ingang van de op-amp. De tweede op-amp IC2 is niets meer dan de reeds eerder behandelde inverterende



**Figuur 121:** De spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

menger (hoofdstuk 7). Deze telt de signalen op de punten M1 en M3 op. De weerstandsverhouding tussen R5, R6 parallel aan R7 en R9 zorgt voor een mooi gelijkgericht signaal aan de uitgang.

### Het schema op uw trainer

U kunt dit nuttige experiment aan de hand van figuur 120 opbouwen op twee van uw experimenteerprinten. In figuur 121 zijn de spanningen op de diverse punten van de schakeling weergegeven, als u aan de ingang een driehoekvormige spanning aanlegt.

U ziet nu dat IC1 zich inderdaad keurig gedraagt. De grote spanningssprong naar een van de voedingsspanningen treedt nu niet meer op. Dat komt door de dubbele terugkoppeling en draagt, zoals reeds geschreven, bij tot het goede hoogfrequente gedrag van de schakeling.

### Verklaring van de werking

De gedetailleerde werking van de schakeling kunnen we het beste verklaren aan de hand van de tekeningen figuur 122.

Maar eerst een paar feiten recapituleren:

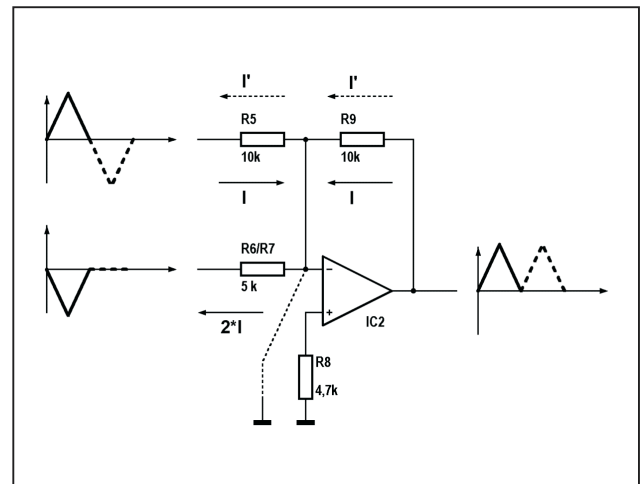
- stroom loopt steeds van + naar -, aan de hand van de richting van stroom door een weerstand kunnen we bepalen hoe de polariteit is van de spanningsval over die weerstand;
- bij de inverterende mengversterker ligt de negatieve ingang van de op-amp virtueel aan de massa, de spanning op dat punt is nul;
- de ingangsweerstand van de inverterende ingang is zeer hoog, de stroom die in of uit de op-amp vloeit is te verwaarlozen;
- de weerstanden tussen de twee ingangen en de inverterende ingang en de terugkoppelweerstand verhouden zich als 1 tot 0,5 tot 1 (vandaar de parallel geschakelde weerstanden R6 en R7).

#### Optie 1:

##### een positieve spanning aan de ingang

Deze spanning vindt u, door de werking van IC1, even groot maar negatief terug op punt M3. Door weerstand R5 loopt een bepaalde stroom  $I$  in de getekende richting, dus naar de op-amp IC2 toe.

Door weerstand R6/R7 loopt een tweemaal zo grote stroom, in tegengestelde richting. Op het knooppunt tussen alle weerstanden (de inverterende ingang) komt een stroom  $I$



**Figuur 122:** De werking van de mengtrap voor positieve en negatieve ingangsspanningen.

aan en gaat een stroom  $2 * I$  weg. Er ontbreekt dus een “komende” stroom  $I$  en deze kan alleen via de terugkoppelweerstand R9 worden aangeleverd. Door R9 vloeit een stroom in de getekende richting, hetgeen betekent dat de uitgang van de op-amp op een positieve spanning staat. Omdat R9 en R5 even groot zijn, moeten ook de spanningsvallen over beide weerstanden gelijk zijn. Over R5 staat de ingangsspanning, dus ook over R9 meet u dezelfde spanning. De inverterende ingang staat op nul volt, conclusie is dat de uitgangsspanning gelijk is aan de ingangsspanning. Een positieve spanning op de ingang wordt omgezet in precies dezelfde spanning op de uitgang.

#### Optie 2:

##### een negatieve spanning op de ingang

Op punt M3 staat nu geen spanning, want diode D1 spert en de inverterende ingang van IC1 staat op nul volt. Er vloeit dus nu geen stroom door de weerstand R6/R7. Door R5 vloeit wél stroom, maar nu van het knooppunt weg. Als er een stroom  $I$  wegvloeit uit het knooppunt, dan moet er van elders een even grote stroom naar dat punt toe vloeien. Dat kan natuurlijk alleen maar via R9, die over deze weerstand een spanning opbouwt, precies gelijk aan de spanning bij een positieve ingang. Conclusie: een negatieve spanning aan de ingang wordt omgezet in een even grote, maar positieve spanning.



**Besluit**

Hiermee is de werking van de ideale gelijkrichter verklaard.

Een slotopmerking: de nauwkeurigheid van de schakeling hangt af van de precieze weerstandsverhoudingen.

Deze luiden:

$$R1 = R3 = R5 = R9$$

en

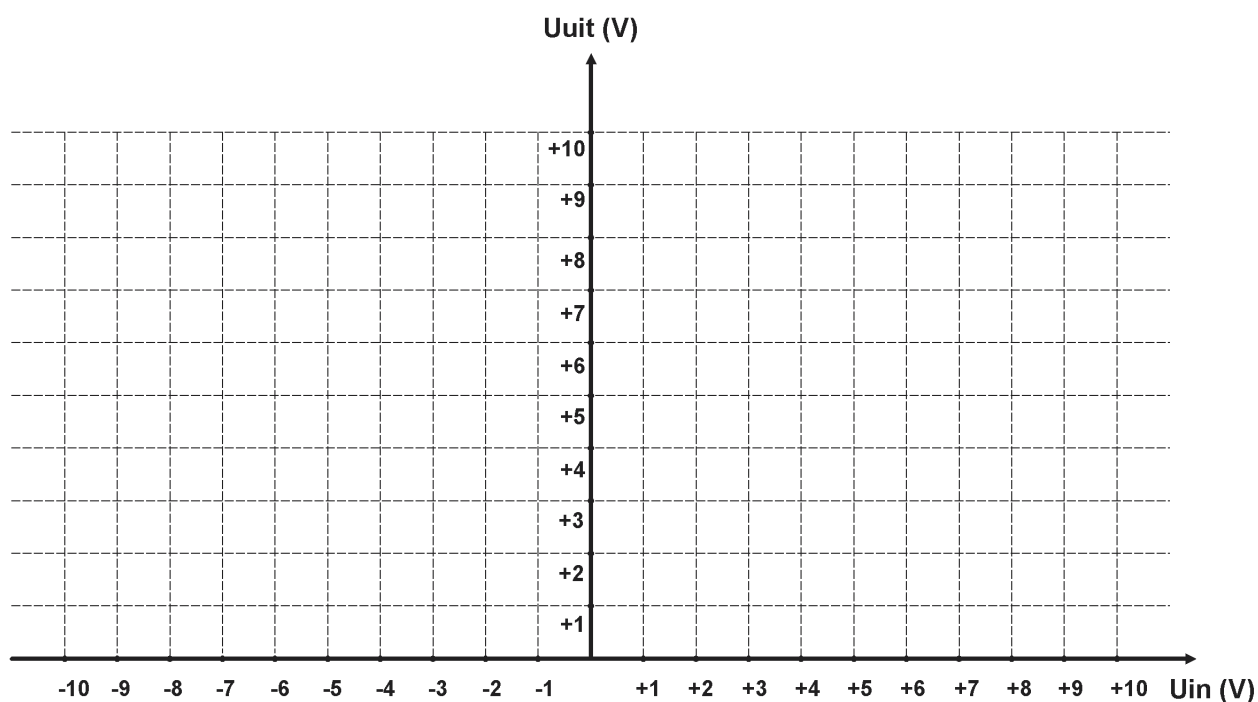
$$R6/R7 = \frac{1}{2} * R1$$

Het gebruik van 1 % weerstanden is noodzakelijk!

**Zélf meten**

Ook nu kunt u weer de schakeling uitmeten en het verband tussen in- en uitgangsspanning in de lege grafiek intekenen.

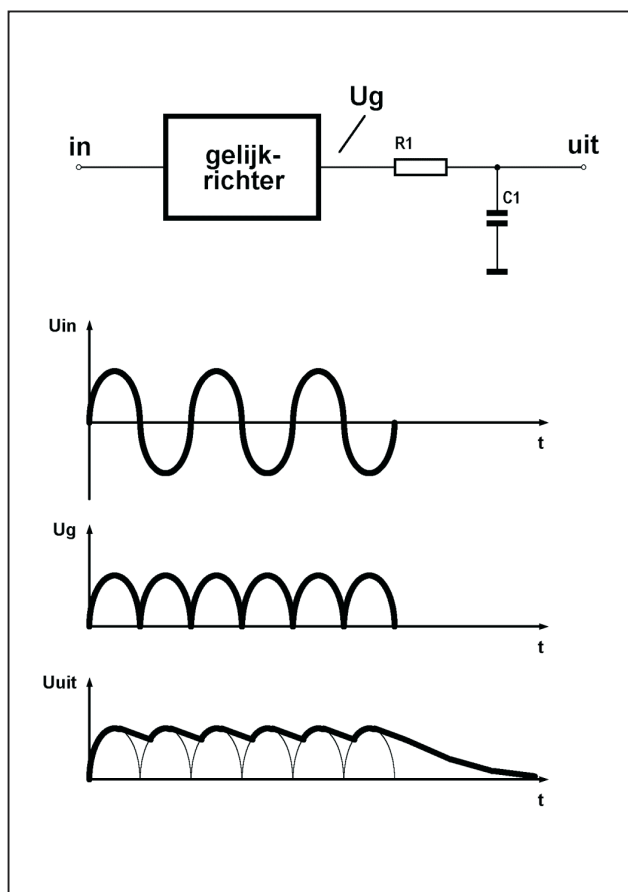
**VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!**



## 21 De op-amp als topdetector

### Inleiding

De in de vorige hoofdstukken beschreven gelijkrichters vormen een wisselspanning om in een pulserende gelijkspanning. Deze spanning is niet zonder meer geschikt voor verdere bewerking. Vaak zult u immers de grootte van de wisselspanning willen meten en dan moet u een zo glad mogelijk verlopen- de spanning hebben.



**Figuur 123:** Een RC-netwerkje (laagdoorlaat filter) zet de gelijkgerichte wisselspanning van de op-amp gelijkrichter om in een meetbare gelijkspanning.

Dat kunt u bereiken door over de uitgang van de gelijkrichter een condensator te plaatsen. Deze condensator laadt zich bij iedere halve periode van de ingangsspanning op tot de topwaarde en gaat tussen twee halve perio-

den weer langzaam ontladen. Het resultaat is een gladgestreken signaal, wel met een aanzienlijke rimpel. Deze rimpel kunt u nog kleiner maken door het uitgangssignaal van de gelijkrichter af te vlakken met een RC-netwerkje. Over de condensator ontstaat dan een gelijkspanning, waarvan de grootte overeenkomt met de gemiddelde waarde van de wisselspanning.

Zoals uit figuur 123 blijkt, reageert deze schakeling vrij snel op variaties aan de ingang. Als het wisselspanningssignaal wegvalt, dan zal de gelijkspanning op de uitgang vrij snel naar nul gaan, door het ontladen van de condensator C via de weerstand R en de zeer lage uitgangsimpedantie van de op-amp.

Die snelle reactie is in dit geval ook noodzakelijk, want u wilt uiteraard geen half uur wachten op de resultaten van de wisselspanningsmeting. Er zijn echter ook toepassingen te verzinnen waarbij u de spanning op de condensator zo lang mogelijk wilt vasthouden. Denk bijvoorbeeld aan een VU-meter, die niet het gemiddelde signaal moet weer-geven, maar de pieken uit het signaal.

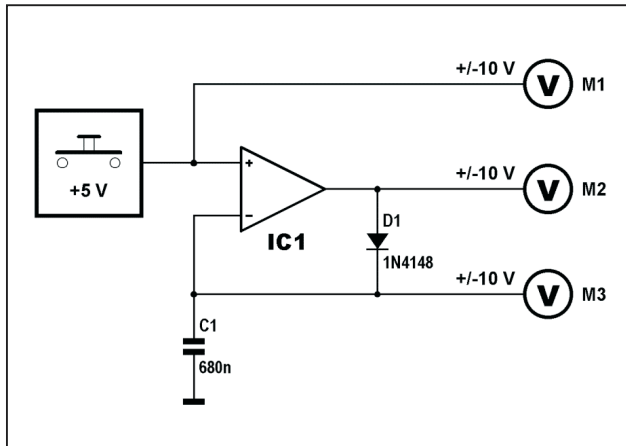
### De topdetector

Voor zo'n geval kunt u een beroep doen op een zogenaamde topdetector, waarvan het meest eenvoudige schema in figuur 124 is weergegeven. De schakeling koppelt het positieve uitgangssignaal terug naar de invertende ingang via de geleidende diode D1 en schakelt de op-amp uit voor negatieve uitgangsspanningen. Een systeem, bekend van de werking van de ideale diode.

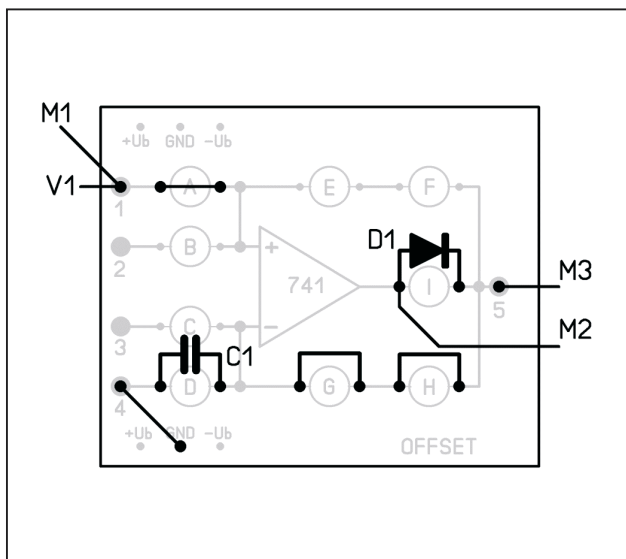
In figuur 125 is de schakeling op uw universele op-amp trainer getekend.

### Werking van de schakeling

Aan de hand van de grafieken van figuur 126 kunt u de werking van de schakeling doorgronden. Aan de ingang wordt een pulsvoor-

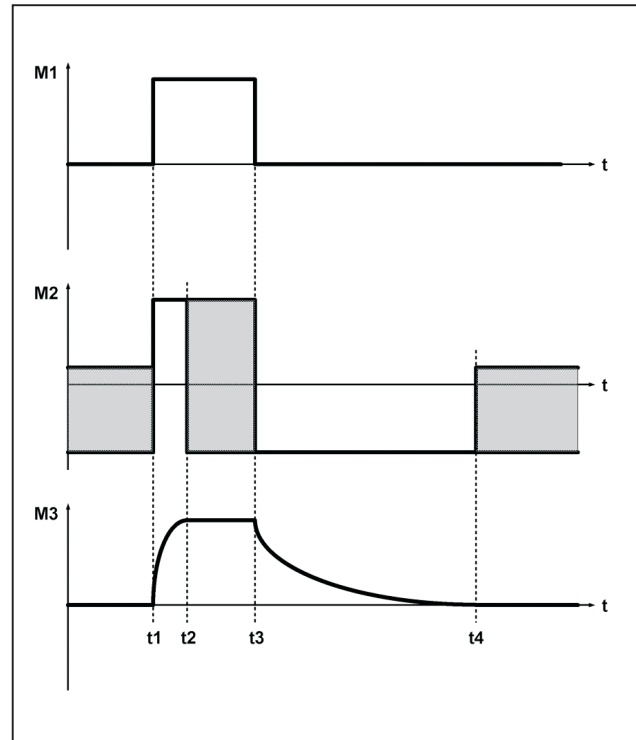


**Figuur 124:** Het eenvoudigste schema van de topdetector.



**Figuur 125:** De schakeling op uw experimenteerprint.

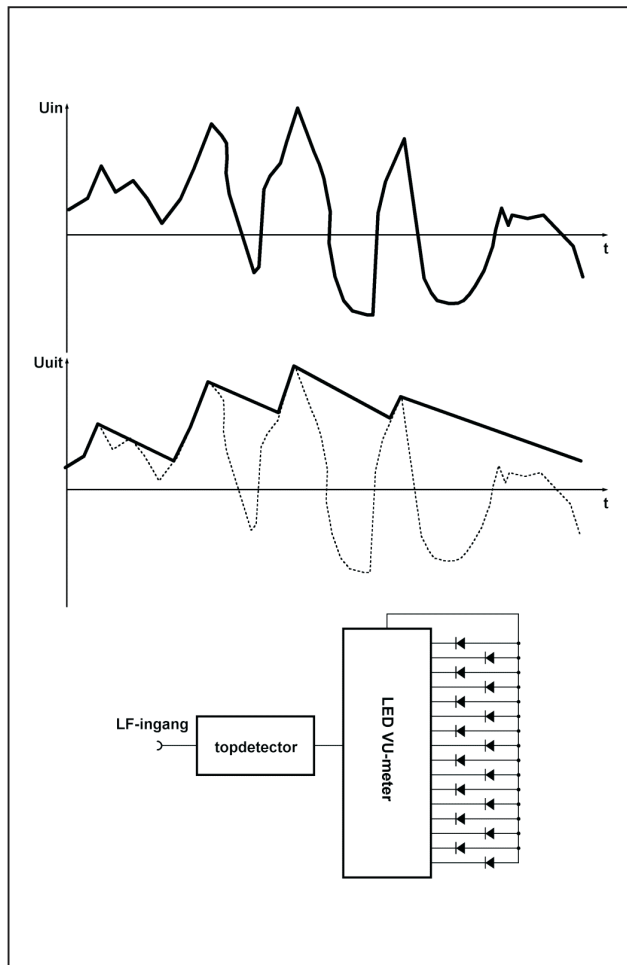
mige spanning aangesloten, die u door middel van een van de drukknoppen op het frontpaneel van de trainer kunt opwekken. Stel de spanningspotentiometer in op +5 V. Als aan de ingang geen spanning wordt aangeboden, met andere woorden, als de ingang op nul volt staat, dan zal de uitgangsspanning van de op-amp niet exact te voorspellen zijn. Het kan zijn dat de uitgang vastloopt tegen de negatieve voeding, of er kan een kleine positieve spanning te meten zijn. Een en ander is afhankelijk van de offset van de op-amp. Vandaar dat we in de grafieken dat gebied gearceerd hebben weergegeven. Hoe dan ook, de uitgang van de schakeling, af te takken van de inverterende ingang, is nul. Bij vastlopen van de op-amp tegen de



**Figuur 126:** De spanningen op de belangrijkste punten van de schakeling.

negatieve voedingsspanning spert de diode, bij positieve uitgangsspanning zal de geleidingsspanning van de diode ervoor zorgen dat de inverterende uitgang op hetzelfde potentiaal staat als de positieve ingang: nul volt. Bij het verschijnen van de positieve ingangspuls ontstaat er in eerste instantie een groot spanningsverschil tussen beide ingangen. De uitgang reageert hierop door vast te lopen tegen de positieve voedingsspanning. De diode gaat geleiden, de condensator wordt opgeladen via de lage uitgangsimpedantie van de op-amp. De uitgangsspanning van de topdetector stijgt dus vrij snel tot de topwaarde van de ingangspuls. Op tijdstip  $t_2$  is de spanning op de uitgang gelijk aan de ingangsspanning. De comparator klapt om. Zolang de ingangspuls aanwezig blijft, zal de uitgang van het IC steeds omslaan tussen +10 V en -10 V. De condensator ontladit immers en bovendien zorgt ieder rimpeltje op de ingangsspanning voor het ompolen van het spanningsverschil tussen beide ingangen.

Na het wegvallen van de ingangspuls is de spanning op de inverterende ingang groter dan de spanning op de niet-inverterende in-



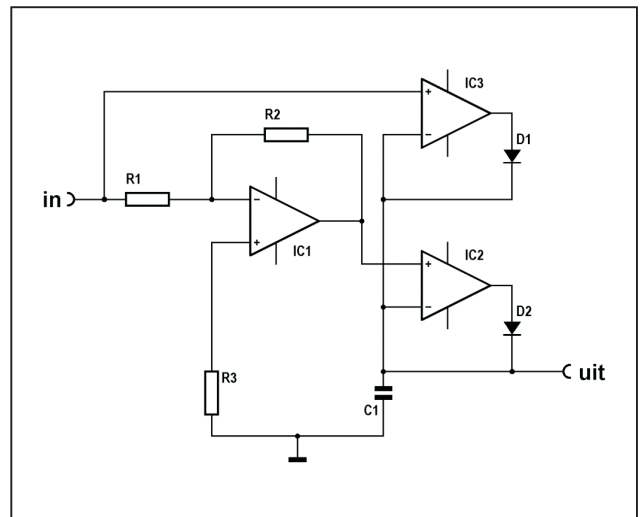
**Figuur 127:** Het schema van een VU-meter rond de topdetector.

gang. De uitgang loopt vast tegen de negatieve voedingsspanning, de diode spert. De condensator gaat nu zeer langzaam ontladen via de eigen lekweerstand van het onderdeel en de hoge ingangsimpedantie van de op-amp. Zelfs met de relatief lage waarde voor C1 van 680 nF duurt het enige tientallen seconde alvorens de spanning tot nul is gedaald.

### VU-meter

Met dit eenvoudige schakelingetje kunt u een zeer gevoelige VU-meter opbouwen. Kijk maar figuur 127! Aan de uitgang van de topdetector wordt een LED VU-meter aangesloten. Deze elektronische meters zijn, vanwege hun traagheidsloze reactie op de ingangsspanning, uiteraard ideaal voor het opbouwen van top VU-meters.

Aan de ingang van de schakeling legt u een LF-spanning, bijvoorbeeld de uitgangsspan-



**Figuur 128:** Een schakeling die zowel op positieve als op negatieve toppen reageert.

ning van een muziekinstrument. De topdetector zal het verloop van de (positieve) ingangsspanning volgen en na een piek langzaam teruglopen. De korte piekspanning, die zonder topdetector niet eens zichtbaar zou zijn op de uitlezing, wordt nu als het ware verbreed, zodat u een prettige uitlezing van het maximale uitgangssignaal van het muziekinstrument verkrijgt en u uw installatie (bijvoorbeeld een mengpaneel met een recorder) kunt afregelen op onvervormde opname van de grootste piek.

### Opmerking

De schakeling heeft één groot nadeel en dat is dat ze alleen reageert op positieve toppen. Vandaar dat echte piekmeters zijn uitgerust met twee topdetectoren, die zowel de positieve als de negatieve pieken omzetten in een spanning die een meter kan sturen. Het eenvoudigste schema van de uitgebreide schakeling is getekend in figuur 128. De op-amp's IC2 en IC3 zijn de twee topdetectoren. Er is slechts één condensator C1 noodzakelijk, de detector die de grootste ingangsspanning te verwerken krijgt, zal de condensator opladen.

IC1 is niets anders dan een inverterende x1 versterker. Deze inverteert het wisselspanningsingangssignaal. Een positieve top verschijnt dus even groot, maar negatief van polariteit, aan de uitgang. De ingang van IC2 gaat rechtstreeks naar de ingang van de

schakeling en verwerkt de positieve toppen. De negatieve toppen worden door IC1 geïnverteerd en sturen de tweede topdetector rond IC3.

## 22 De op-amp als ideale topdetector

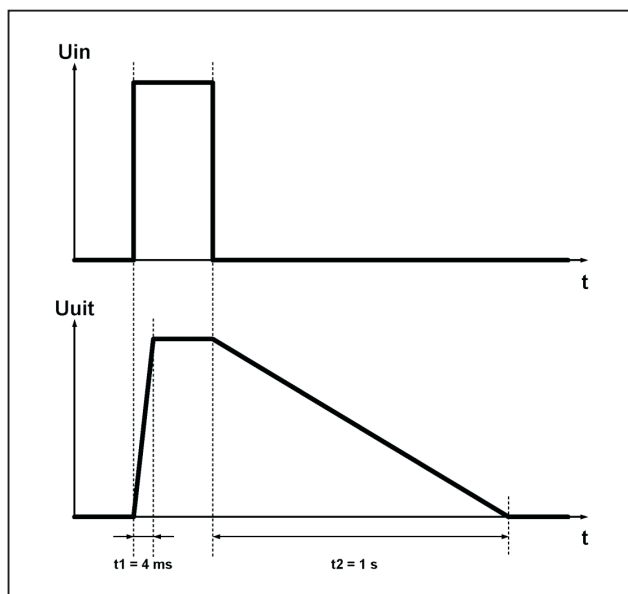
### Inleiding

De topdetector van hoofdstuk 21 zult u nooit in professionele apparatuur aantreffen. Waarom niet?

Omdat de belastingsweerstand van de schakeling de werking beïnvloedt. We hebben gesteld dat de ontlading van de condensator wordt bepaald door de eigen ontlaadstroom van het onderdeel en door de geringe stroom die de op-amp opeist. Daarnaast echter staat de belasting, bijvoorbeeld een LED VU-meter, rechtstreeks over de condensator. Deze schakeling trekt uiteraard ook een stroom en deze stroom bepaalt het ontladen van de condensator. Het is altijd een zeer ongewenste situatie als de werking van uw schakeling wordt beïnvloed door de schakeling die erop is aangesloten.

Dat is al een eerste reden om deze eenvoudige schakeling af te wijzen.

Daarnaast zijn er bepaalde normen, die de reactietijd van een piek VU-meter op een plotselinge spanningssprong vastleggen, zie figuur 129.



**Figuur 129:** De respons van een topdetector op een ingangspuls is door internationale normen vastgelegd.

Volgens de BBC-normen, een organisatie die in de vroege dagen van de geluidsreproductie heeft gepioneerd en vandaar een aantal eigen normen internationaal erkend heeft gezien, moet een piekmeter in 4 milliseconden reageren op een piek aan de ingang. Na het wegvallen van de piek moet de spanning in ongeveer 1 seconde terugvallen naar nul. Deze tijden zijn met de eenvoudige basis-schakeling van het vorige experiment niet zo goed instelbaar en vandaar dat men een uitgebreide schakeling heeft ontworpen, waarbij zowel de reactietijd als de terugvaltijd door middel van een weerstandje over een breed gebied instelbaar zijn.

### De schakeling

De schakeling is getekend in figuur 130 en maakt gebruik van twee operationele versterkers. U herkent ongetwijfeld bekende zaken! IC1 heeft geen terugkoppeling en zal dus wel als comparator zijn geschakeld. IC2 heeft een condensator tussen in- en uitgang, we plakken hem dus maar het etiketje "integrator" tussen de pootjes. Terecht!

Zo'n combinatie van een comparator en een integrator hebben wij u reeds voorgesteld als opwekker van driehoek- en vierkantsgolven. Het gekke (maar tevens het fascinerende van de elektronica) is nu dat u dezelfde schakeling met een paar kleine wijzigingen kunt omtoveren in een ideale topdetector.

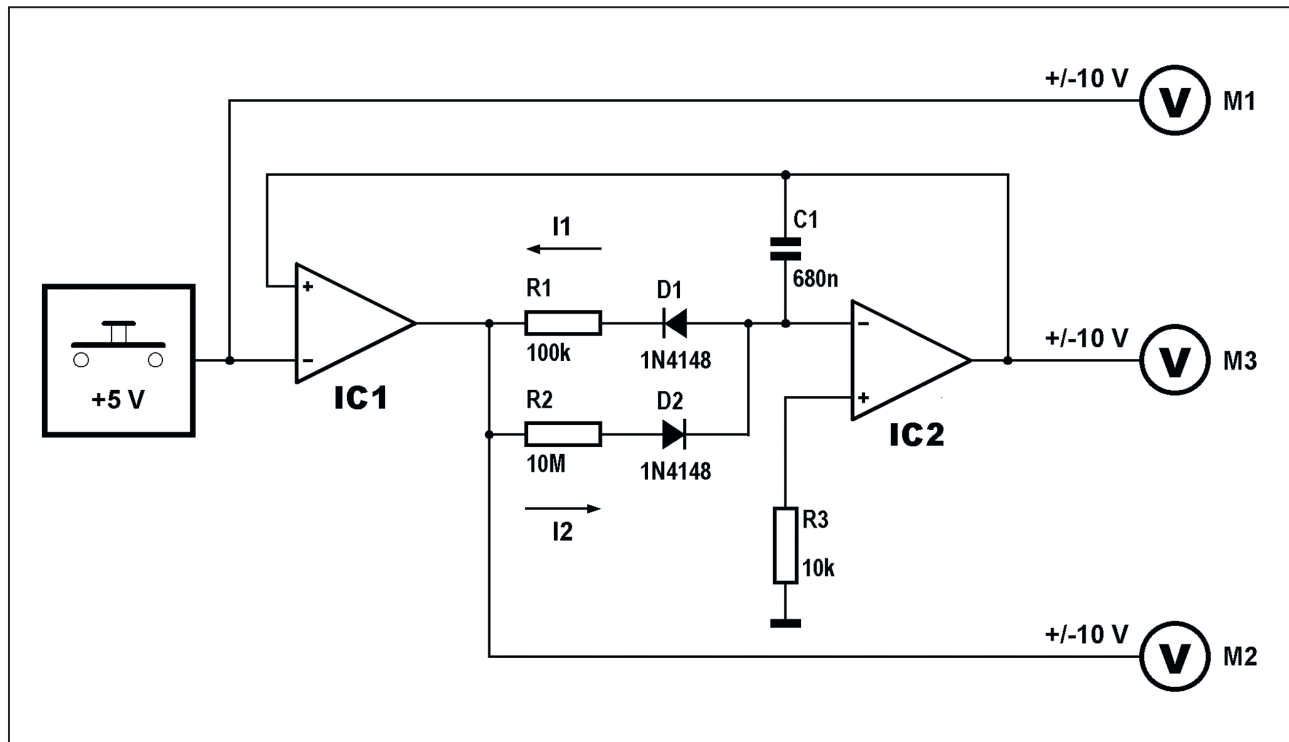
### Het schema op uw trainer

In figuur 131 is de bedrading van dit experiment op uw twee experimenteerprintjes voorgesteld.

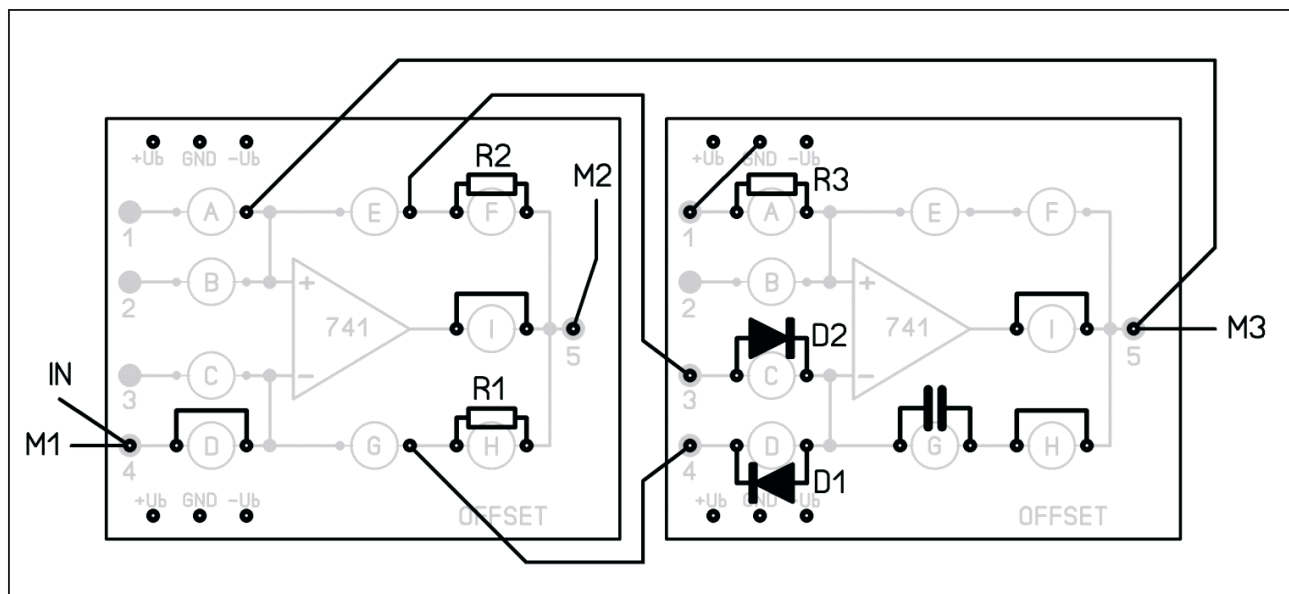
### De werking

De werking van de schakeling volgt uit figuur 132. Bij 0 V aan de ingang zal de uitgang van de schakeling op- en neergaan tussen enige mV positief en enige mV negatief. Onmeetbaar dus op uw meters, maar wél aanwezig.





**Figuur 130:** Het schema van een ideale topdetector.



**Figuur 131:** De schakeling in de praktijk.

Als de uitgangsspanning iets positief wordt, door de offsetdrift van de integrator, dan slaat de comparator om. De positieve ingang is dan immers positief ten opzichte van de nul volt op de negatieve ingang. De uitgang van de comparator wordt positief. De integrator wordt gestuurd door een stroom I2 via R2 en D2. Deze stroom zal de uitgangsspanning van de integrator laten dalen. Na enige tijd is de uitgangsspanning van de schakelaar eni-

ge mV negatief, de comparator klappt om. De negatieve uitgangsspanning ontladent de condensator van de integrator met een stroom I1 via R1 en D1. De uitgangsspanning wordt positief. Kortom, met nul volt aan de ingang schommelt de uitgangsspanning rond de nul en de uitgang van de comparator klappt voortdurend om. Op tijdstip t1 wordt er een positieve puls aangeboden aan de negatieve ingang van

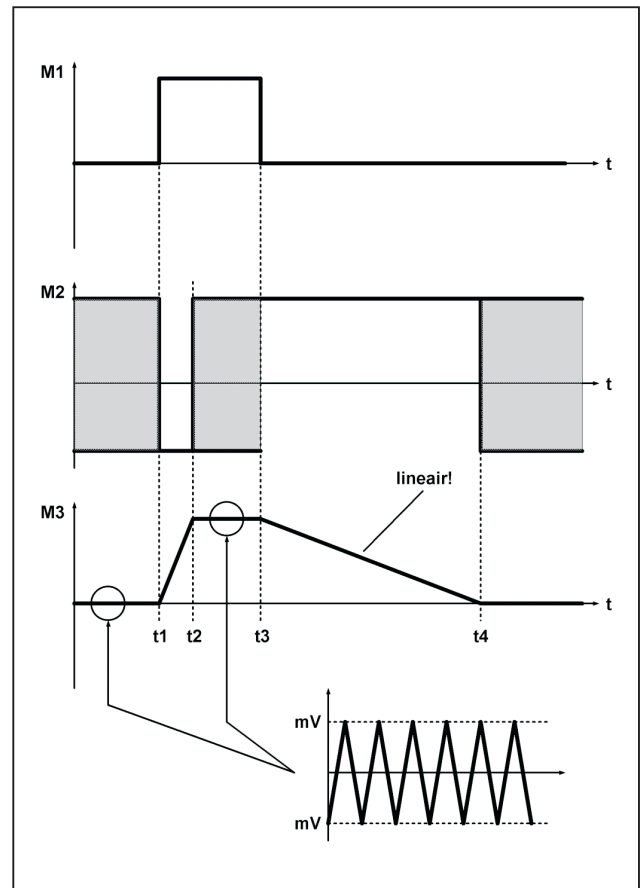
IC1. De uitgang van de comparator reageert dadelijk door de negatieve voedingsspanning op te zoeken. De condensator C1 wordt nu opgeladen met een stroom  $I_1$ . De uitgangsspanning van de integrator stijgt. De waarde van  $I_1$  wordt bepaald door de grootte van  $R_1$ . Door deze weerstand instelbaar te maken kunt u het volgen van de ingang door de uitgang aanpassen aan de genoemde norm.

Als de uitgangsspanning iets groter wordt dan de ingang, klappt de comparator om. Ook nu dus gaat de uitgangsspanning van de schakeling enige millivolt schommelen rond de topwaarde van de ingangsspanning. De uitgang van de comparator zal voortdurend omklappen tussen het ene en het andere voedingsniveau.

Wat gebeurt er na  $t_3$ , het moment waarop de ingangsspanning naar nul gaat? De positieve ingang van de comparator is positiever dan de negatieve ingang, bijgevolg levert deze schakeling een positieve uitgangsspanning. Deze spanning zal, via weerstand  $R_2$  en diode  $D_2$ , de condensator gaan ontladen. De grootte van de ontlaadstroom is instelbaar door het variëren van de waarde van weerstand  $R_2$ .

### Slotopmerking

Tot slot zij nog opgemerkt dat ook deze schakeling alleen reageert op positieve pulsen. Vandaar dat u haar moet combineren met een tweede schakeling. Het grapje van de inverterende versterker gaat nu echter niet op. We hebben immers nu slechts één topdetector en geen twee eenvoudig te combineren schakelingen. Vandaar dat men deze schakeling meestal laat voorafgaan door de in een vorig experiment besproken volle periode gelijkrichter. De volledige schakeling van de topdetector bevat dan niet minder dan vier operationele versterkers, maar dan heeft u wel het neusje van de zalm op dit gebied. En het leuke is dat u, aan de hand van onze experimenten, gemakkelijk is staat bent zo'n schakeling zelf te ontwerpen.



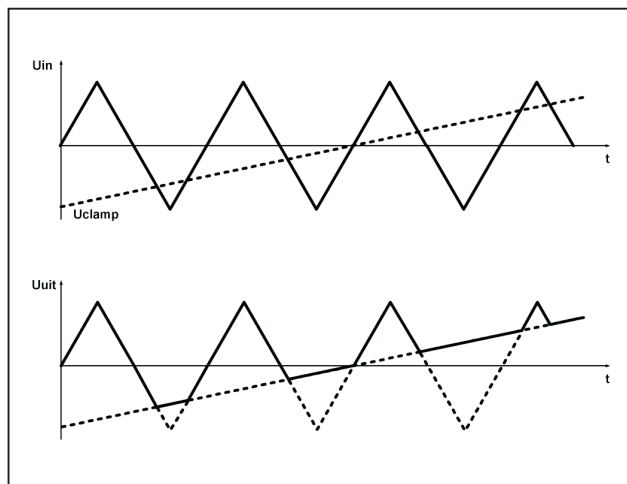
**Figuur 132:** Grafische verklaring van de werking van de schakeling.



## 23 De op-amp als clampschakeling

### Inleiding

Een clampschakeling is een schakeling die een signaal vastlegt op een bepaalde clampspanning. Als dit wat cryptisch klinkt, kijk dan naar figuur 133. Een driehoekvormige ingangsspanning wordt in een clampschakeling vergeleken met een spanning  $U_{\text{clamp}}$ . Zolang de ingangsspanning groter is dan de clampspanning, zal de uitgang de ingang volgen. Als de ingangsspanning kleiner wordt dan de clampspanning, zal de uitgang de clampspanning volgen.



**Figuur 133:** De werking van een clampschakeling wordt verduidelijkt aan de hand van deze grafieken.

De clampschakeling legt dus een spanning vast op een bepaald niveau. De uitgangsspanning van de schakeling zal nooit onder de clampspanning kunnen zakken.

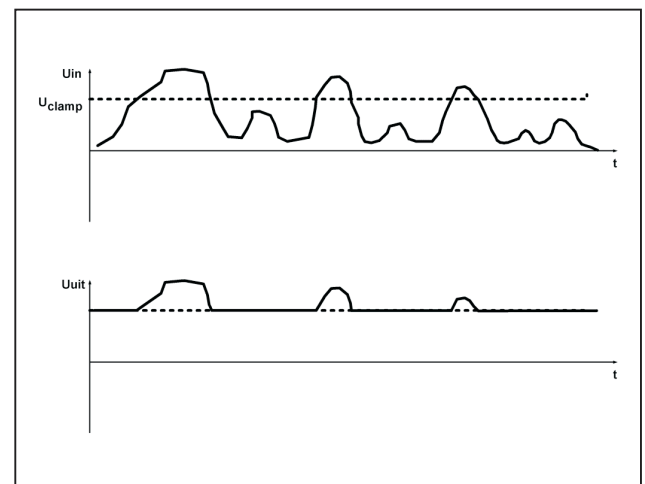
Uiteraard kunt u net zo goed een schakeling ontwerpen die omgekeerd werkt: de uitgangsspanning zal dan nooit boven de clampspanning kunnen stijgen.

In feite kent u een dergelijke schakeling al: de simpele "ideale" diode van hoofdstuk 18, immers, is een clampschakeling die ervoor zorgt dat de uitgangsspanning de ingang volgt tot aan nul volt toe. Negatiever kan de uitgang niet worden. De eenvoudige gelijk-

richter is dus een clampschakeling met een clampspanning van nul volt.

### Toepassingen

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de schakeling van de clamp veel overeenkomsten vertoont met de enkelvoudige ideale gelijkrichter. Maar voor we aan de behandeling van het schema toekomen eerst een zinnvoller vraag: wat doet u met zo'n schakeling? Figuur 134 geeft het antwoord.



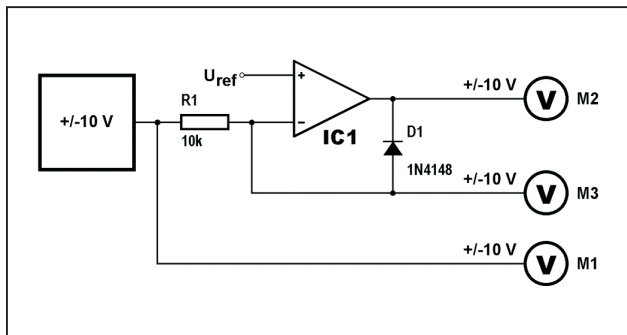
**Figuur 134:** Het uitfilteren van ongewenste stoorsignalen met een clampschakeling.

Het ingangssignaal  $U_{\text{in}}$  bestaat uit een reeks signaalpiekjes, met een heleboel kleinere signaaltjes er tussendoor. Met dit signaal wilt u iets doen, bijvoorbeeld het aantal pieken per seconde meten. Als u dit signaal zonder meer aan de ingang van een frequentieteller aanbiedt, dan zou deze meter een veel te hoge frequentie registreren. Het apparaat kan immers geen onderscheid maken tussen de te tellen signaalpieken en de ruispiekjes. Door middel van het tussenschakelen van een clampschakeling met een instelbare clampdrempel kunt u de ongewenste ruispiekjes uit het uitgangssignaal filteren, zodat de frequentieteller alleen de te tellen signaalpieken registreert.

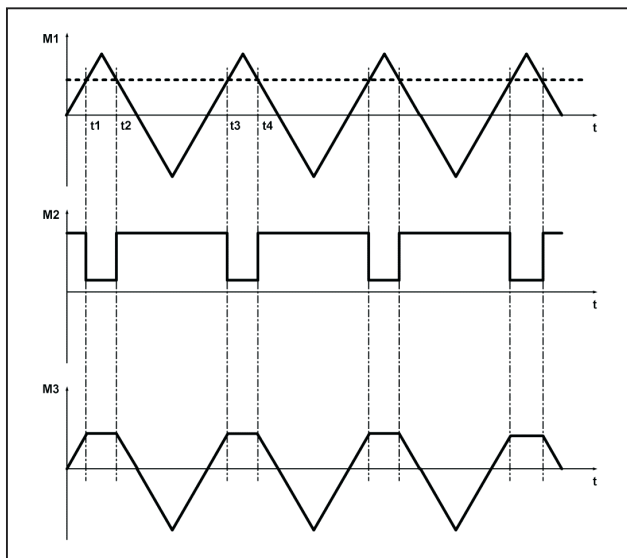
Clampkringen worden ook toegepast in de geluidselektronica, waar u er zeer vervreemde geluidseffecten mee kunt opwekken.

### Het schema

Zoals u ongetwijfeld verwachtte, vertoont het schema van figuur 135 zeer veel overeenkomsten met het schema van de ideale diode. De werking van de schakeling wordt verduidelijkt aan de hand van de grafieken van figuur 136.

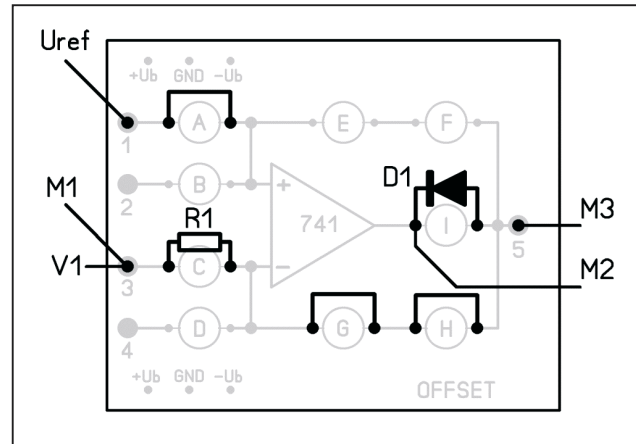


**Figuur 135:** De eenvoudigste schakeling van een clampkring die clampt op een bovendrempel. De spanning op de uitgang kan niet positiever worden dan de clampdrempel  $U_{ref}$



**Figuur 136:** De werking van de schakeling grafisch toegelicht.

Stel dat de ingangsspanning kleiner is dan de referentiespanning. De negatieve ingang op de op-amp is dan negatiever dan de positieve ingang, de uitgang loopt vast tegen de positieve voedingsspanning. De diode D1 gaat



**Figuur 137:** De clampschakeling op uw experimenteerprint.

bijgevolg sperren. Tussen de in- en de uitgang staat nu alleen weerstand R1 en als u de schakeling met een zeer hoge weerstand belast (zoals het geval is met de meters van de trainer), dan meet u op de uitgang dezelfde spanning als op de ingang.

Op tijdstip t1 wordt de ingangsspanning gelijk aan de clampreferentie. De negatieve ingang van de op-amp wordt positiever dan de positieve ingang, de schakeling klapt om. De uitgang wordt nu negatief, de diode gaat geleiden en de op-amp stelt de spanning op de negatieve ingang gelijk aan de spanning op de positieve ingang. De uitgang blijft op het clampniveau staan.

De schakeling werkt nu als een buffer, waarbij de uitgang en de negatieve ingang de spanning op de positieve ingang overnemen. De situatie blijft gehandhaafd tot de negatieve ingang weer lager wordt dan de positieve, de uitgang van de op-amp positief wordt, de diode spert en de op-amp in feite wordt uitgeschakeld. De uitgang is dan weer rechtstreeks verbonden met de ingang.

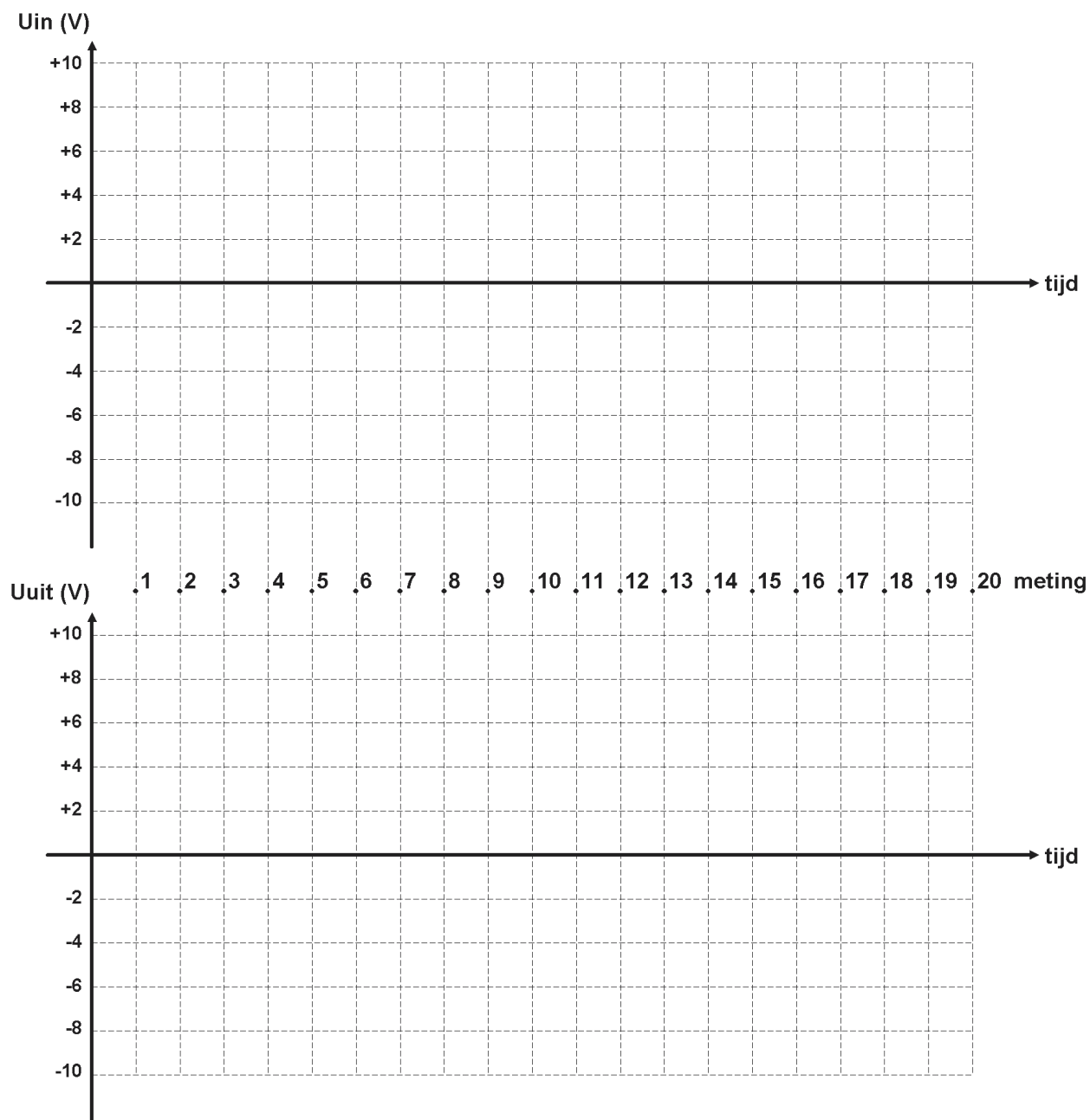
### De clampkring op de trainer

In figuur 137 is de schakeling getekend zoals u deze op uw experimenteerprint moet onderbrengen. U weet inmiddels zonder enige twijfel hoe u de werking van de schakeling kunt controleren en hoe u verder met de schakeling op eigen initiatief kunt experimenteren! U kunt bijvoorbeeld diverse clampspanningen instellen en telkens meten hoe de uitgangsspanning hierop reageert.





## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!



## 24 De op-amp als sinusgenerator

### Inleiding

In een van de vorige experimenten heeft u geleerd hoe u een sinusspanning kunt opwekken uit een driehoekspanning door middel van een niet-lineaire terugkoppeling. Het nadeel van deze schakeling is de relatief hoge vervorming op de sinus. Met een op-amp kunt u echter ook rechtstreeks een sinusvormige spanning opwekken en dit met een bijzonder lage vervorming!

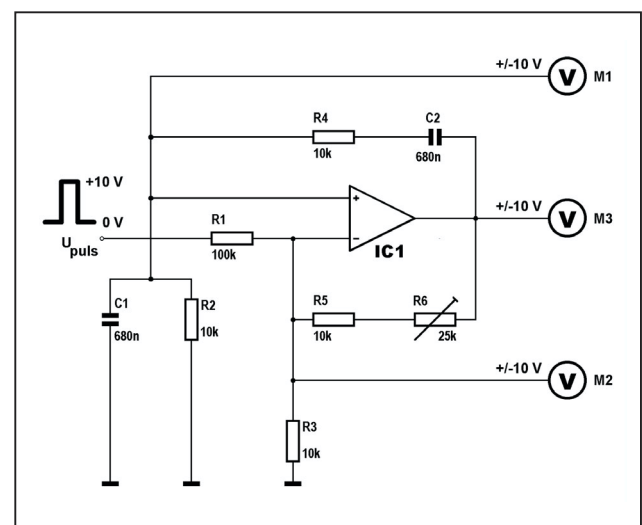
### Ruis

Alvorens in te gaan op de schakeling die daarvoor nodig is, moeten we eerst iets vertellen over ruis. Ruis is een verschijnsel dat eigen is aan alle elektronische schakelingen. In het algemeen kunnen we ruis omschrijven als een stoorspanning, die optreedt in iedere schakeling. Er zijn verschillende fysische processen bekend waardoor ruis kan worden opgewekt. Een van de meest voorkomende is de zogenaamde thermische ruis. Onder invloed van de temperatuur gaan vrije elektronen in onderdelen van het ene atoom overspringen naar een andere. Deze elektronenbeweging veroorzaakt een klein stroompje en de som van al deze uiterst kleine stroompjes wekt een ruisspanning op. Uit deze verklaring zal duidelijk zijn dat ruis een statistisch verschijnsel is. Het exacte verloop van een ruisspanning is niet te voorspellen, we kunnen immers niet bepalen wanneer een bepaald atoom een elektron zal afstoten. Ruis wordt gekenmerkt door een breed frequentiespectrum. Als we een ruisspanning zouden analyseren naar de frequentie-inhoud van het signaal, dan zouden we vaststellen dat zowat alle frequenties in min of meerdere mate in het ruissignaal aanwezig zijn.

### Het principe van de sinusgenerator

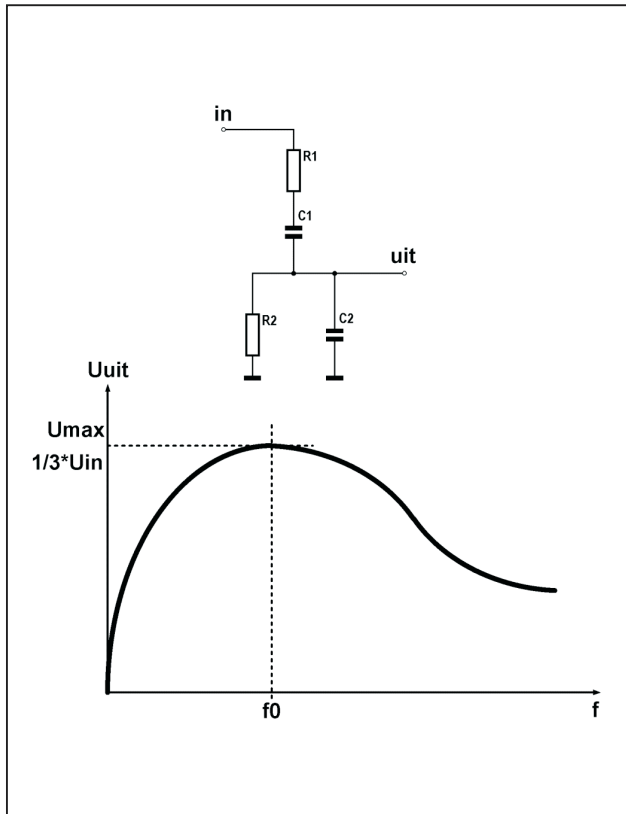
Na deze geleerde inleiding kunnen we de werking van een sinusoscillator gaan verdui-

delijken. Het basisschema is getekend in figuur 138. U ziet twee terugkoppelingen van de uit- naar de ingangen. De negatieve ingang is door middel van een weerstandsdeeler R3, R5 en R6 verbonden met de uitgang. Deze terugkoppeling herkent u ongetwijfeld van de niet-inverterende versterker.



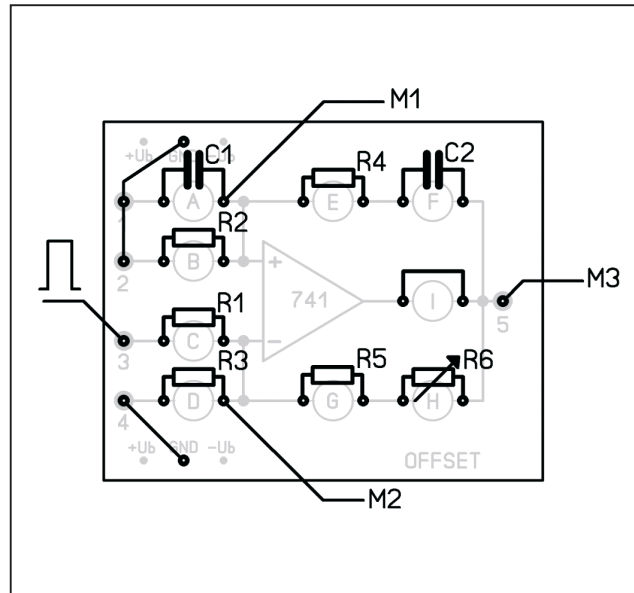
**Figuur 138:** Het basisschema van een sinusoscillator met een op-amp en een zogenaamde “brug van Wien”.

Tussen de uitgang en de massa staat een tweede netwerk, opgebouwd uit twee weerstanden en twee condensatoren. Zo'n netwerk noemt men een “brug van Wien”. Het knooppunt van dit netwerk gaat naar de positieve ingang. Een eigenschap van deze RC-combinatie is dat ze frequentieselectief is. Dat wil zeggen dat de verzwakking van het netwerk niet constant is, maar afhankelijk is van de frequentie. In figuur 139 is dat weergegeven. Als u aan de ingang van het netwerk een wisselspanning legt met constante grootte maar variërende frequentie, dan meet u op de uitgang een frequentie karakteristiek zoals weergegeven op de grafiek. Voor lage frequenties van hetingangssignaal meet u nauwelijks signaal op de uitgang. Laat u de frequentie stijgen, dan stelt u vast



**Figuur 139:** De frequentiearakteristiek van een brug van Wien vertoont een minimale verzwakking bij één welbepaalde frequentie  $f_0$ .

dat de uitgangsspanning toeneemt. Bij een bepaalde frequentie  $f_0$  meet u een maximale uitgangsspanning, die overigens nog kleiner is dan de spanning op de ingang. Bij verder stijgen van de frequentie gaat de uitgangsspanning weer afnemen. U kunt dus besluiten dat de verzwakking van het netwerk voor één bepaalde frequentie minimaal is. Dit valt te verklaren uit de frequentie-afhankelijke wisselstroomweerstand van een condensator. Zoals bekend neemt de wisselstroomweerstand van een condensator af met stijgende frequentie. Voor signalen met een lage frequentie hebben beide condensatoren een grote weerstand. De weerstandsdeling wordt dan bepaald door de hoge waarde van de impedantie van C1 en de veel lagere waarde van R2. Er verschijnt slechts weinig spanning aan de uitgang. Voor hoge frequenties hebben de condensatoren een zeer lage impedantie. De spanningsdeling wordt dan hoofdzakelijk bepaald door de lage waarde van de impedantie van C2 en de veel



**Figuur 140:** Het schema van de sinusgenerator op uw experimenteerprint.

hogere weerstand R1. Ook nu verschijnt er slechts een fractie van de ingangsspanning aan de uitgang. Tussen beide frequentiegebieden in ligt één frequentie, waarbij de wisselstroomweerstand van de condensatoren precies gelijk is aan de waarde van de weerstanden. De spanningsdeler verzwakt dan minimaal, de uitgangsspanning is maximaal maar toch nog steeds slechts gelijk aan een derde van de ingangsspanning.

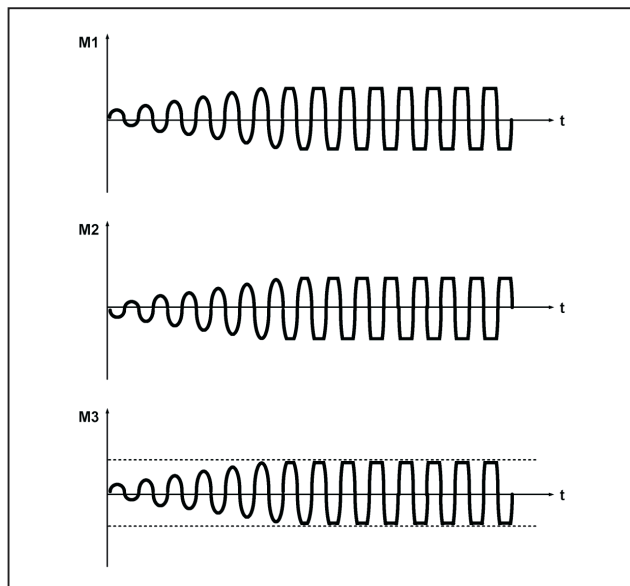
Met deze kennis gaan we de sinusgenerator van figuur 138 aanpakken.

### Experimenteren met de schakeling

Bouw de schakeling op de proefprint volgens figuur 140, waarbij in eerste instantie de weerstand R1 niet met de puls drukknop wordt verbonden. Stel de instelpotentiometer R6 in op maximale weerstand. Schakel nu de voedingsspanning in: er gebeurt niets, de uitgangsspanning blijft nul. Verdraai nu zeer langzaam de looper van de instelpotentiometer. Op een bepaald moment zal de naald van de meter M3, aangesloten op de uitgang, nauwelijks merkbaar gaan schommelen. Laat de instelpotentiometer onmiddellijk met rust en observeer wat er gebeurt. U zult waarnemen dat de schommelingen van de naald langzaam maar zeker groter worden. Na een tot twee minuten slaat de meternaald te pletter tegen beide schaaleinden.

### Een vreemd verschijnsel verklaard

Wat er gebeurt is grafisch weergegeven in de karakteristieken van figuur 141. De uitgangsspanning neemt langzaam in grootte toe, is in eerste instantie sinusvormig, maar zal later ongeveer blokvormig gaan verlopen, omdat de versterker wordt overstuurd.



**Figuur 141:** Het spanningsverloop van de schakeling bij het starten van de oscillator.

Hoe is dit te verklaren? Bij het inschakelen van het printje komt de schakeling onder spanning te staan en in ieder onderdeel wordt een kleine ruis spanning opgewekt. De ruis spanning op de uitgang wordt teruggekoppeld naar beide ingangen. Naar de positieve ingang via de frequentieselectieve werking van het RC-netwerk, naar de negatieve ingang via de weerstandsdeler. Een bepaalde frequentie zal minimaal verzwakt op de positieve ingang terecht komen, namelijk met een verzwakking van  $1/3$ .

Zolang de versterker minder dan drie maal versterkt, zal er verder niets gebeuren. De verzwakking van het RC-netwerk wordt dan niet gecompenseerd door de versterking van de op-amp en de aanzet tot oscillatie, door de grote ruis puls bij het aanschakelen van de voedingsspanning, sterft uit.

Anders wordt het, als u door het verdraaien van de instelpotentiometer de versterking van de op-amp net iets boven een factor drie gaat instellen. Het minimaal verzwakt span-

ninkje uit de ruis met een bepaalde frequentie wordt dan door de op-amp net iets meer versterkt dan het verzwakt was door de RC-kring. Dit signaaltje doorloopt de op-amp en verschijnt iets groter op de uitgang. Het versterkt signaaltje wordt weer teruggekoppeld naar de positieve ingang, verschijnt daar iets groter dan voorheen en wordt wederom versterkt.

Kortom, het signaal doorloopt telkens de op-amp en bij iedere kringloop verschijnt het iets groter op de uitgang. Op het laatst wordt het signaal zó groot, dat het de versterker overstuurt. De uitgangsspanning loopt vast tegen de voedingsspanningen, het signaal vervormt van een sinus tot een blokspanning met trage flanken.

### Besluit

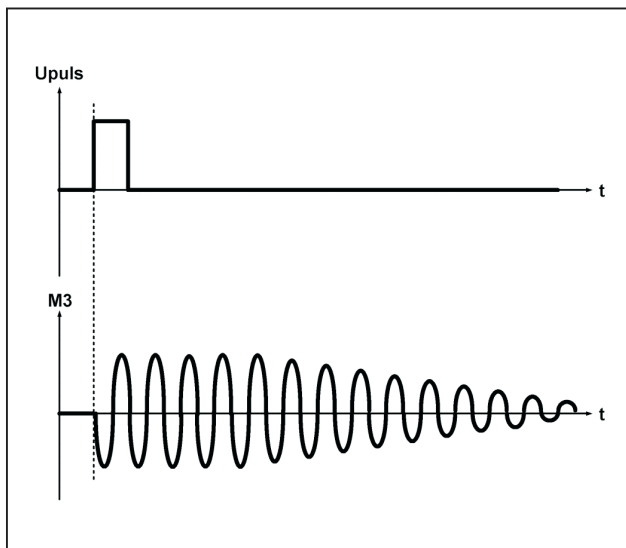
In feite zou de sinusgenerator een stabiel signaal opwekken, als de versterking van de op-amp precies zo groot was dat de verzwakking van het RC-netwerk werd gecompenseerd.

### Het moet automatisch!

Het zal duidelijk zijn dat dit nooit door middel van een simpel weerstandsdelertje is in te stellen. Immers, iedere afwijking van de voorwaarde: versterking van de op-amp is gelijk aan verzwakking van het frequentieselectieve filter, zou het vastlopen van de uitgangsspanning tegen de voedingsspanning, of het uitsterven van de oscillatie tot gevolg hebben, ook al zou dit verschijnsel uren kunnen duren. Probeer het maar eens! Stel de instelpotentiometer zo in, dat op de uitgang een spanning van ongeveer 10 volt top-tot-top wordt opgewekt. Probeer nu dat uitgangssignaal constant te houden door het verdraaien van de instelpotentiometer. Het zal u niet lukken! Ofwel zal de uitgangsspanning gaan stijgen en uiteindelijk weer vastlopen tegen de voedingsspanning, ofwel zal de uitgangsspanning gaan dalen wat leidt tot het uitsterven van de oscillatie. Wat u nodig heeft is een automatische versterkingsregeling, die de versterking van de schakeling steeds zo instelt, dat de schakeling een uitgangssignaal met constante grootte opwekt.

### Een tweede experiment

Alvorens we ons met dit soort schakelingen gaan bezig houden, doen we eerst nog een experimentje met de basisopzet. Sluit weerstand R1 aan op een van de puls drukknoppen op de trainer, waarbij de spanningsprong wordt ingesteld op +10 V. Regel nadien de instelpotentiometer R6 af, zodat de schakeling net niet oscilleert. Druk nu even op de puls drukknop. De schakeling gaat nu oscilleren. Na het loslaten van de drukknop blijft de schakeling oscilleren, maar de amplitude van het uitgangssignaal sterft langzaam weg. De optredende spanningsvormen zijn in figuur 142 afgebeeld. Dit aspect van een sinusoscillator wordt in de praktijk vaak toegepast, bijvoorbeeld bij muziekschakelingen. Door middel van zo'n wah-wah schakeling (zo wordt deze schakeling genoemd) kunt u de sustain of het uitsterven van een gitaar-aanslag verlengen.



**Figuur 142:** Bij het aanleggen van een korte puls aan een *nét* niet oscillerende schakeling ontstaat op de uitgang een uitdovende trilling.

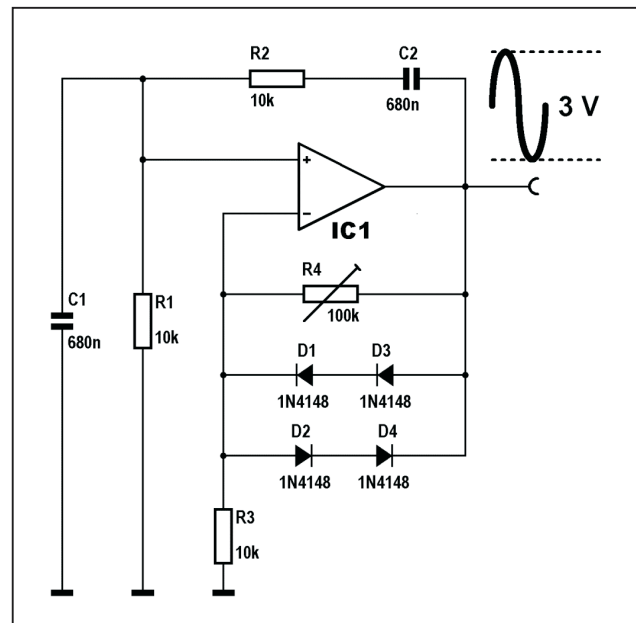
### Automatische versterkingsregeling

Nu terug naar het opwekken van een constant uitgangsniveau. Een spanningsafhankelijke verzwakker kunt u bijvoorbeeld opbouwen door gebruik te maken van de spanning/stroom-karakteristiek van een diode. Zoals u reeds bij twee experimenten heeft ervaren, daalt de inwendige weerstand van

een diode bij stijgende spanning over het onderdeel. Als u een paar dioden opneemt in de versterkingsbepalende onderdelen van de sinusgenerator, zoals getekend in figuur 143, dan zal de oscillator een stabiele sinus opwekken. Door middel van de instelpotentiometer R4 kunt u de uitgang op minimale vervorming afregelen.

### Besluit

Met deze in wezen zeer eenvoudige schakeling kunt u sinusoscillatoren bouwen die een uitgang met ongeveer 1 % vervorming opwekken. In de praktijk is deze vervorming voor een aantal toepassingen nog onaanvaardbaar. Vandaar dat er andere, betere systemen voor automatische versterkingsregeling zijn ontwikkeld, die gebruik maken van FET's. Deze schakelingen leveren, in combinatie met de in dit experiment besproken sinusoscillator, sinussen met vervormingen van enige tienden procent.

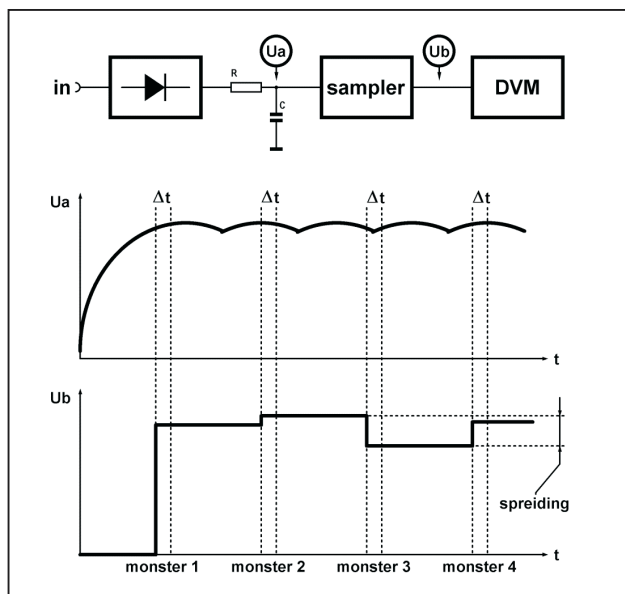


**Figuur 143:** De sinusoscillator wordt uitgebreid met dioden en wekt een mooie sinus op met een constante grootte.

## 25 De op-amp als anti-ripple filter

### Inleiding

Als u met een digitale meter wisselspanningen wilt meten, dan kunnen er problemen ontstaan als gevolg van de rimpel die op de uitgang van de gelijkrichter staat. Een aantal digitale metersystemen werkt immers door middel van de samplemethode. Bij dit systeem, voorgesteld in figuur 144, wordt er gedurende een kleine tijd  $\Delta t$  een monstertje van het gelijkgerichte signaal  $U_A$  genomen. Door middel van een analoog naar digitaal omzetter wordt de grootte van dit monster omgezet in een aantal pulsen, dat wordt geteld door de meter die de spanning onder de vorm van een getal presenteert.



**Figuur 144:** De op de uitgang van de gelijkrichter aanwezige rimpel kan aanleiding geven tot spreiding op de uitlezing van de digitale meter.

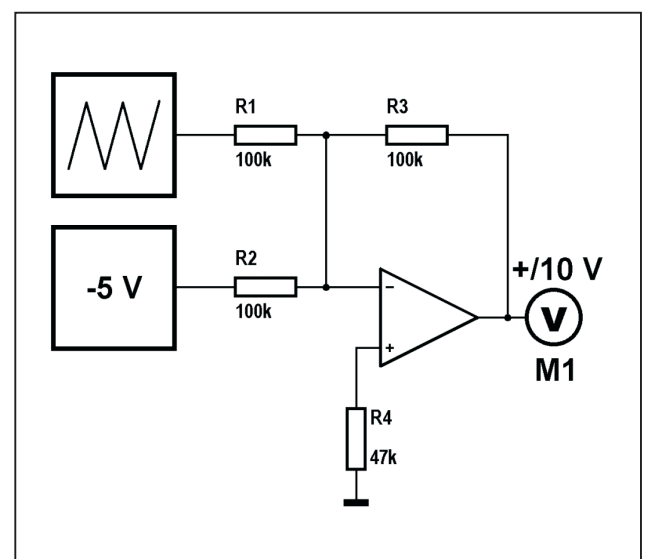
De kans is dan erg groot dat er een spreiding van tientallen millivolt ontstaat op de gemeten waarde, de twee laatste cijfers van de uitlezing gaan voortdurend variëren. Een verschijnsel, bekend onder de naam "jitter". Dat is vrij eenvoudig te verklaren. Monster 2 wordt genomen op het moment dat de uit-

gangsspanning van de gelijkrichter vrijwel maximaal is. Monster 3, echter, wordt genomen op het moment dat de uitgangsspanning minimaal is. Tussen beide metingen zit een verschil, gelijk aan de grootte van de rimpelspanning.

Nu kunt u proberen de rimpel zo klein mogelijk te maken door het vergroten van de waarden van de onderdelen  $R$  en  $C$ . De afvlakking van het gelijkgerichte signaal wordt dan beter, maar het duurt veel langer alvorens de condensator tot de topwaarde van een nieuwe ingangsspanning is gestegen of gedaald. Met andere woorden: de gelijkrichter wordt trager.

### Een rimpelspanning genereren

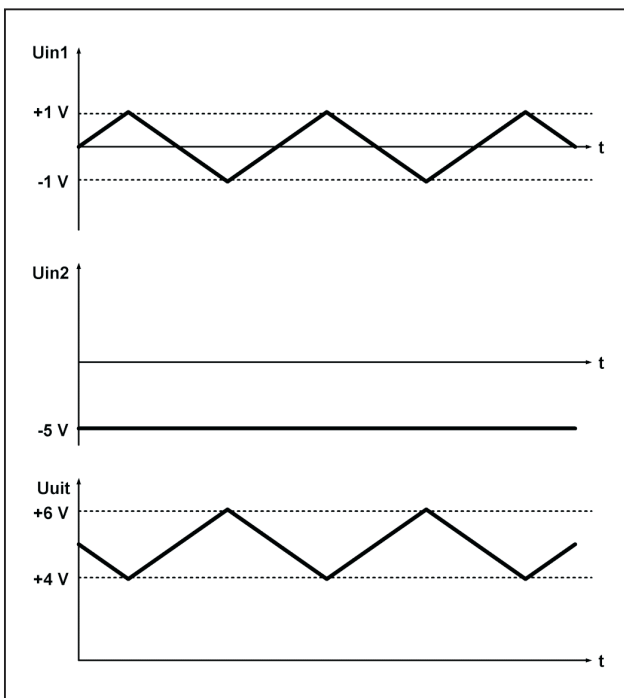
Door middel van een simpel op-amp schakelingetje kunt u een ideaal anti-ripple filter maken, niet geplaagd door enige traagheid van betekenis. Alvorens u echter met deze schakeling kunt experimenteren, moet u uiteraard eerst een gelijkspanning met rimpel opwekken. Ook dat kan met een op-amp'je volgens het schema van figuur 145.



**Figuur 145:** Door middel van een mengertje simuleert u op de trainer een gelijkspanning met rimpel.



Dat is niets anders dan een inverterende mengversterker (zie hoofdstuk 7). Eén ingang wordt aangesloten op een gelijkspanning van  $-5\text{ V}$ , de andere gaat naar de uitgang van de op driehoek geschakelde functiegenerator, met een top-tot-top waarde van  $2\text{ V}$ . De schakeling mengt beide spanningen, zodat u op de uitgang een gelijkspanning van  $+5\text{ V}$  aantreft voorzien van een rimpel van  $2\text{ V}$ , zie de grafieken van figuur 146. De uitgangsspanning van de schakeling varieert tussen  $+6\text{ V}$  en  $+4\text{ V}$ , hetgeen een zeer grote rimpel voorstelt. Zet de frequentie van de driehoek wel op maximale waarde!



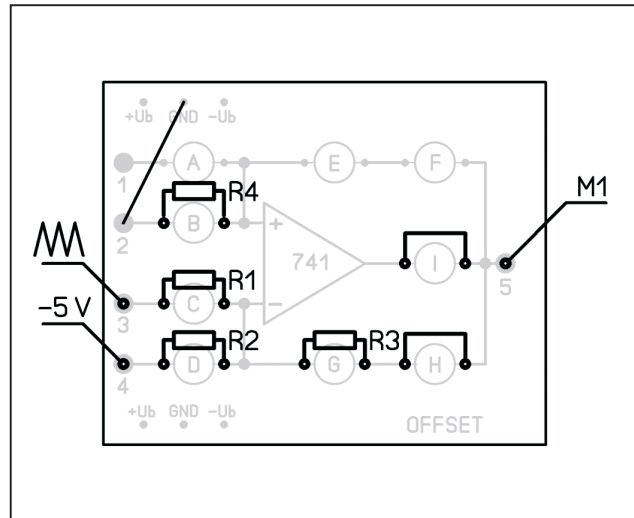
**Figuur 146:** De in- en uitgangsspanningen van de schakeling van figuur 145.

### De schakeling op uw print

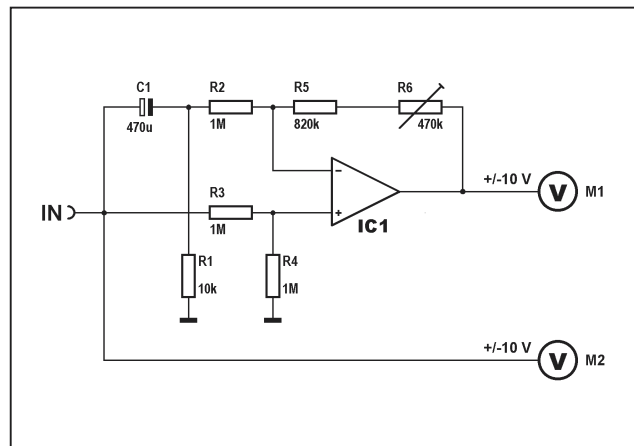
Aan de hand van figuur 147 kunt u deze eerste schakeling van dit hoofdstuk op uw experimenteerprint opbouwen.

### De anti-ripple schakeling

Nu de anti-ripple schakeling. Het op de trainer op te bouwen schema is getekend in figuur 148. U herkent de in hoofdstuk 8 beschreven verschilversterker: vier even grote weerstanden ( $R3$ ,  $R4$ ,  $R2$  en  $R5 + R6$ ), op de voor verschilversterkers specifieke manier geschakeld rond de op-amp.



**Figuur 147:** De schakeling van de rimpelspanningsgenerator op uw experimenteerprint.

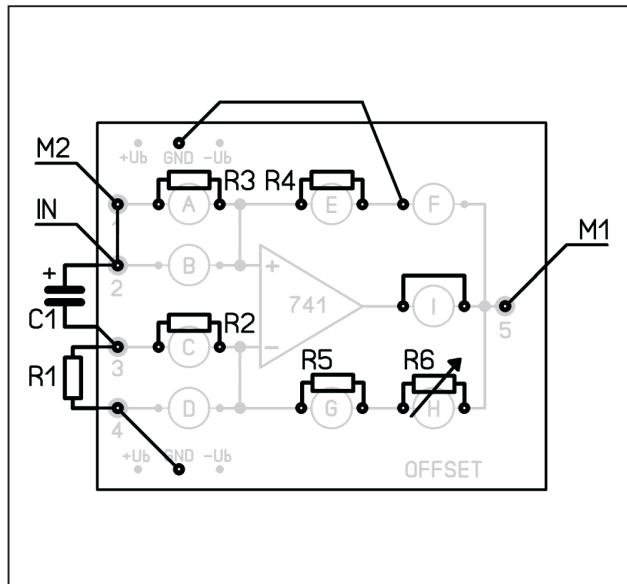


**Figuur 148:** De schakeling van het anti-ripple filter.

Wél zijn er twee verschilpunten: beide ingangen worden gestuurd door één spanning en tussen de ingang en een van de ingangen van de verschilversterker staat een RC-kring. De componenten van deze RC-kring,  $C1$  en  $R1$ , moeten zo worden berekend dat zij de rimpelspanning onverzwakt doorlaten. Omdat we bij de trainer zitten met een maximale frequentie van ongeveer  $1\text{ Hz}$ , moet die condensator erg groot worden gekozen,  $470\text{ }\mu\text{F}$ ! Bij “normale” schakelingen kan de waarde van de condensator veel lager zijn. Als tweede eis wordt gesteld dat de waarde van  $R1$  zo klein mogelijk moet zijn, vergeleken met de weerstanden van de verschilversterker. In het voorbeeld van figuur 148 wordt een verhouding van 1 tot 100 aangehouden.

### De anti-ripple schakeling op uw print

In figuur 149 is de praktische uitvoering van deze schakeling voorgesteld. U moet weliswaar een paar onderdelen op ongebruikelijke plaatsen solderen, maar het kan wél. U kunt de ingang van deze tweede experimenteerprint verbinden met de uitgang van de eerste.



**Figuur 149:** De anti-ripple schakeling op uw experimenteerprint.

### Werking van de schakeling

Hoe werkt deze schakeling? Simpel! De ingangsspanning is opgebouwd uit twee componenten, een gelijkspanning van +5 V en een daarop gesuperponeerde wisselspanning van 2 V top-tot-top waarde. Deze laatste spanning verschijnt op beide ingangen van de verschilversterker. De gelijkspanning, echter, staat alleen op de positieve ingang. Het RC-netwerk spert immers iedere gelijkspanning.

In hoofdstuk 8 hebben we aangetoond dat de uitgangsspanning van een verschilversterker gelijk is aan:

$$U_{\text{uit}} = U_{+} - U_{-}$$

Op de positieve ingang van het anti-ripple filter staat de gelijkspanning  $U_{\text{dc}}$  en de rimpelspanning  $U_{\text{ac}}$ . Op de negatieve ingang staat alleen de rimpelspanning  $U_{\text{ac}}$ .

De uitgangsspanning van de schakeling is dan gelijk aan:

$$U_{\text{uit}} = U_{+} - U_{-}$$

$$U_{\text{uit}} = (U_{\text{dc}} + U_{\text{ac}}) - U_{\text{ac}}$$

$$U_{\text{uit}} = U_{\text{dc}}$$

De rimpelspanning is verdwenen!

### Experimenteren

Sluit de uitgang van de rimpelspanningsgenerator aan op de ingang van het anti-ripple filter. Vergelijk de indicaties op meter M2 (ingangsspanning) en meter M1 (uitgangsspanning). Verdraai de instelpotentiometer R6 tot de rimpelspanning uit de uitgang is gefilterd.

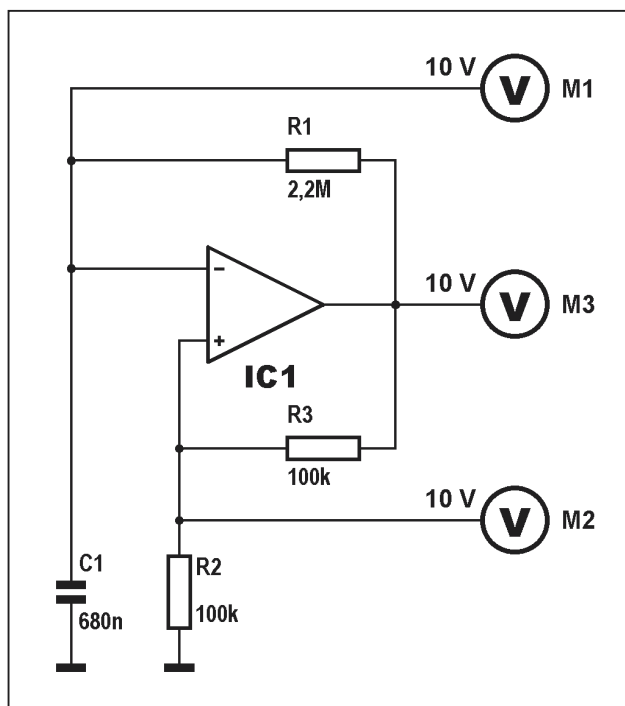
Varieer de grootte van de rimpel en van de gelijkspanning. De uitgang volgt (met enige traagheid, te wijten aan de grote elco) de gelijkspanning maar reageert niet op de rimpel.



## 26 De op-amp als vierkantgolf generator

### Inleiding

Uit de in hoofdstuk 14 besproken functiegenerator kunt u een vierkantsgolf aftappen. Nu zijn er, als u geen prijs stelt op ook een driehoek, eenvoudigere schakelingen voor het opwekken van een vierkantsgolf te verzinnen. In de meeste gevallen heeft u vierkantgolven immers alleen maar nodig voor het sturen van digitale schakelingen en dan heeft u geen voordeel van het beschikbaar zijn van een driehoek. Vandaar dat we in dit experiment de meest simpele methode bespreken voor het opwekken van een vierkantgolf. Het schema is getekend in figuur 150.

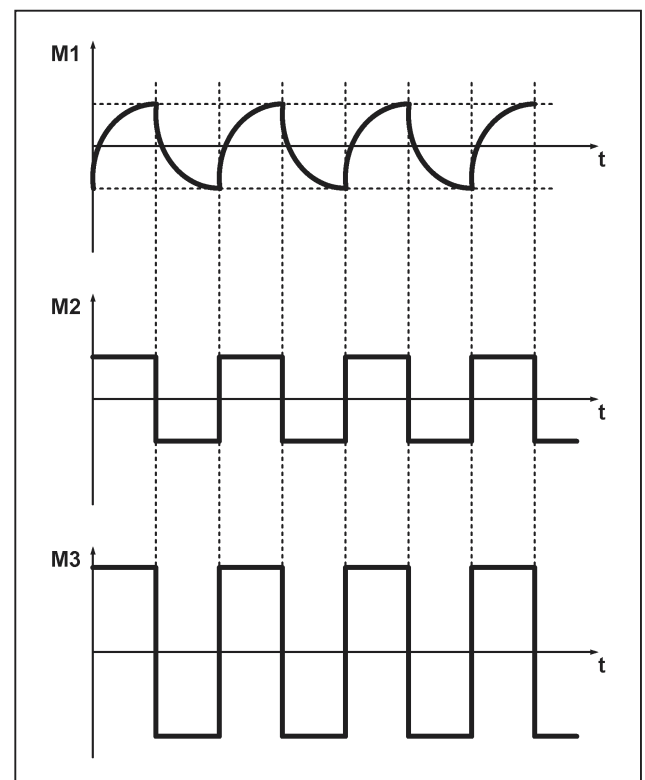


**Figuur 150:** Het basisschema van een op-amp als vierkantgolf generator.

### Het schema

Ook bij deze schakeling ziet u een dubbele terugkoppeling: een resistieve tussen de uitgang en de positieve ingang, een RC-kring tussen de uitgang en de negatieve ingang. De werking van de schakeling volgt uit de grafieken van figuur 151.

Stel dat bij het inschakelen van de voedingspanning (tijdstip  $t_1$ ) de uitgangsspanning van de op-amp gelijk is aan de positieve voedingsspanning. Door middel van de spanningsdeler R2-R3 zal de helft van deze uitgangsspanning op de positieve ingang terecht komen. De condensator C1 was uiteraard volledig ontladen. De negatieve ingang staat op een negatievere spanning dan de positieve ingang, de uitgangsspanning is inderdaad gelijk aan de positieve voedingsspanning.



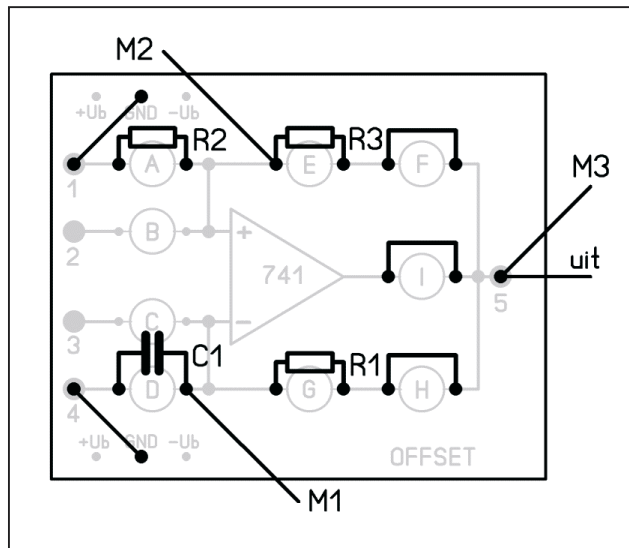
**Figuur 151:** De spanningen op de punten van de schakeling.

De condensator gaat zich opladen via de weerstand R1. De spanning op de negatieve ingang stijgt dus en na een bepaalde tijd wordt deze spanning groter dan de spanning op de positieve ingang. De op-amp klappt om, de uitgangsspanning loopt vast tegen de negatieve voedingsspanning. De positieve in-

gang wordt ingesteld op de helft van deze spanning. De condensator gaat nu ontladen, R1 is immers op een zeer negatieve spanning aangesloten. Na een bepaalde tijd wordt de spanning op de negatieve ingang kleiner dan de spanning op de positieve ingang, de op-amp klappt weer om.

### De schakeling op uw trainer

In figuur 152 is deze schakeling ingevuld op uw experimenteerprint. Door het variëren van de waarden van C1 en R1 kunt u de frequentie veranderen. Op de meter M3 ziet u dat door het tempo waarin de meternaald van de ene hoek naar de andere gaat.



**Figuur 152:** Het schema van de vierkantgolf generator op uw experimenteerprint.

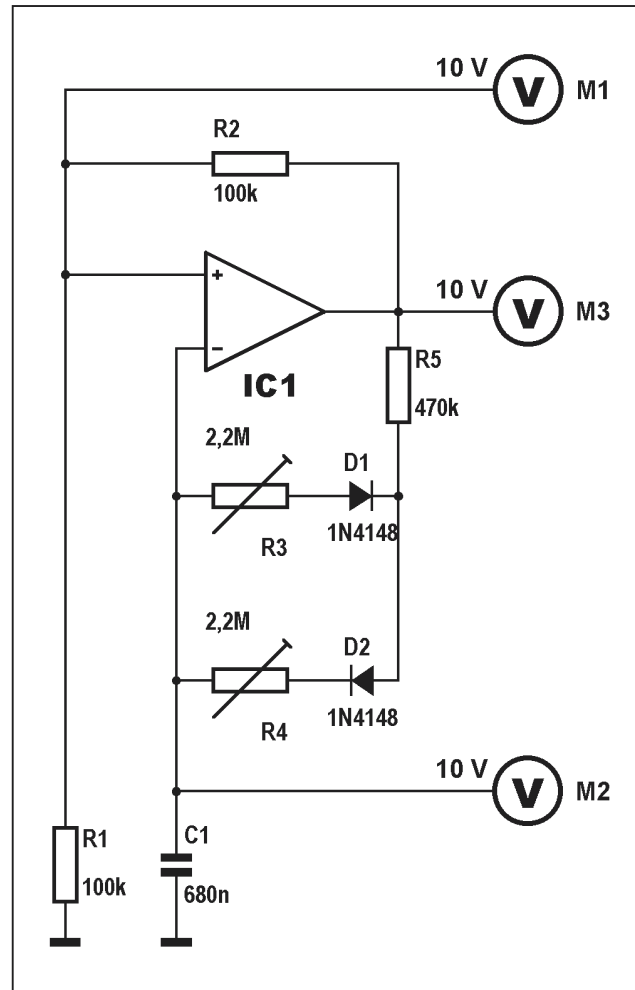
### Conclusie

Op de uitgang van de schakeling verschijnt een blokgolf, waarvan de frequentie wordt bepaald door het op- en ontladen van de condensator C1 via de weerstand R1. Het volstaat dus de waarde van een van beide componenten te variëren voor het regelen van de frequentie. Meestal schakelt u de condensator om voor het kiezen van het frequentiebereik en regelt u met de potentiometer R1 de frequentie in het geselecteerde bereik.

### Symmetrisch of asymmetrisch?

De schakeling van figuur 150 wekt een ongeveer symmetrische blokgolf op. Het tijdsinter-

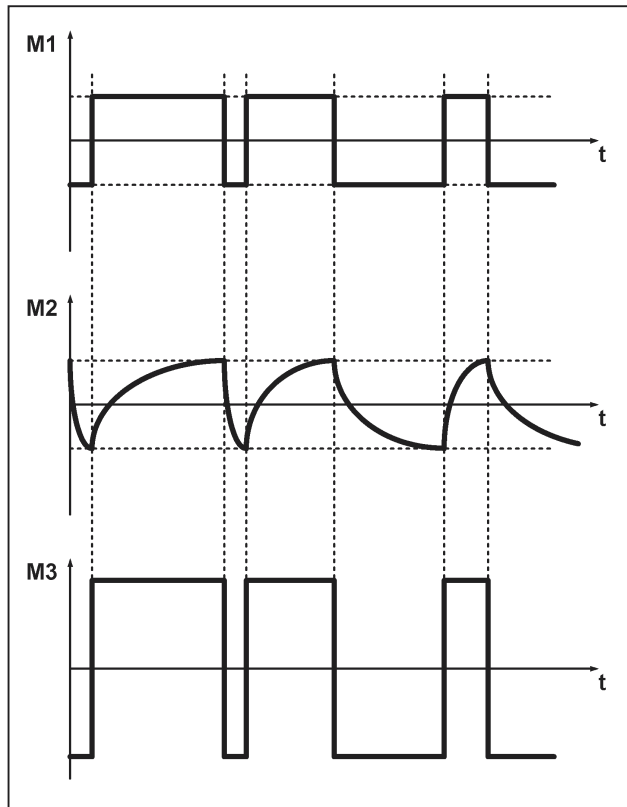
val  $t_1$ - $t_2$  is ongeveer gelijk aan het tijdsinterval  $t_2$ - $t_3$ . Voor sommige toepassingen kan dat bezwaarlijk zijn. Met enige kleine uitbreidingen kunt u de schakeling omvormen tot een pulsgenerator, die smalle positieve of negatieve pulsjes kan opwekken. Het universele schema van een pulsgenerator met een op-amp is getekend in figuur 153.



**Figuur 153:** Een uitbreiding van het principe tot pulsgenerator.

Door middel van twee dioden wordt het laden en ontladen van de condensator afzonderlijk geregeld door twee weerstanden R3 en R4. Als de uitgangsspanning van de op-amp positief is, dan zal D1 sperren en D2 geleiden. Door deze laatste diode vloeit dan de laadstroom, waarvan de grootte wordt bepaald door de waarde van de weerstand R4. Als de uitgang negatief is, dan spert D2 en gaat D1 geleiden. De condensator wordt dan ontladen door de weerstand R3.

In de grafieken van figuur 154 zijn de spanningen op de diverse punten van de schakeling getekend voor twee diverse instellingen van de potentiometers. In het ene geval wekt de schakeling smalle negatieve pulsen op, in het andere geval iets bredere positieve pulsen.



**Figuur 154:** De spanningsvormen in het schema van figuur 153.

### Besluit

Uit dit experiment blijkt dat u een op-amp kunt integreren in een digitaal systeem, opgebouwd met C-MOS schakelingen. Vaak heeft u in een digitaal systeem behoefte aan een klokoscillator en zijn alle poorten, beschikbaar in de gebruikte digitale IC's, bezet door andere functies. Het is dan vaak voordeliger een goedkoop op-amp'je toe te passen dan een nieuw digitaal IC te introduceren waarvan slechts de helft of een vierde wordt gebruikt.

Wel één waarschuwing: de normale goedkope op-amp's, zoals 741 en 3140, zijn in wezen laagfrequente schakelingen. Het is niet mogelijk met deze schakelingen pulsen op te wekken met stijgtijden van enige tientallen

nanoseconden, zoals dat wel kan met digitale schakelingen. Deze eigenschap van op-amp's beperkt de bruikbaarheid van deze schakelingen in digitale systemen.

Als u echter een of ander eenvoudig digitaal deurbelletje wilt ontwikkelen, kunt u de klokoscillator zonder meer in handen geven van een op-amp. Haal het echter niet in uw hoofd in een snelle computerschakeling op-amp'jes te gebruiken! Dat gaat gegarandeerd mis!





## 27 De op-amp als flip-flop

### Inleiding

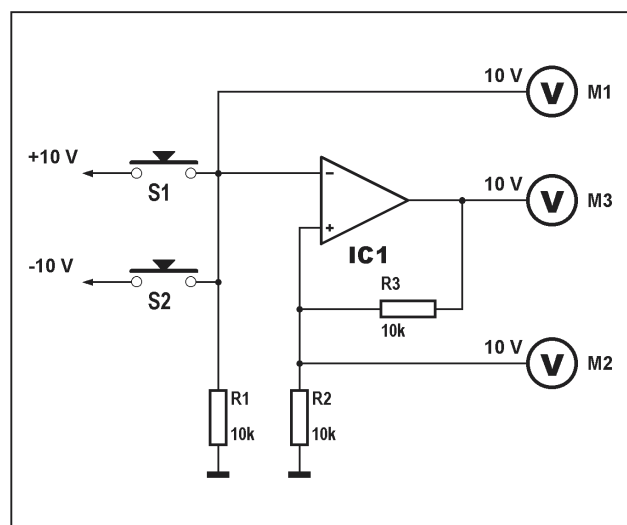
Flip-flop's zijn dé basisschakelingen van de digitale elektronica. Door middel van een flip-flop kunt u het even aanwezig zijn van een spanningspiekje "bewaren". Een flip-flop is dus een elektronisch geheugen dat in staat is het verschijnen van een kortstondig pulsje om te zetten in een in principe eeuwig durende uitgangsvariatie. Er bestaan honderden digitale IC's die even veel uitvoeringen van flip-flop's bevatten. Het ligt dus niet zo voor de hand voor deze functie een op-amp in te huren. Toch kan het soms voordeliger zijn een flip-flop op te bouwen rond een op-amp, dan beroep te doen op een van de vele digitale flip-flop IC's.

Zeker nu er talloze IC's in de handel zijn die vier identieke op-amp's bevatten doet zich vaak de praktijksituatie voor dat u een op-amp'je over houdt en tegelijkertijd een flip-flop nodig heeft. Dan is het natuurlijk economischer de niet gebruikte op-amp toe te passen.

### Basisschema

De basisuitvoering van de op-amp als flip-flop is getekend in figuur 155. De positieve ingang van de op-amp is door middel van een weerstandsdeler verbonden met de uitgang. Dezelfde opzet als bij de blokgolf oscillator! Overigens met hetzelfde doel: de spanning op de uitgang vast te leggen op één van de voedingsspanningen tot er iets gebeurt op de negatieve ingang. Dat "iets" is in dit geval het verschijnen van een smal positief of negatief pulsje. Op de trainer kunt u dit simuleren door middel van de twee pulsdrukknoppen. Een van de twee gelijkspanningsbronnen stelt u in op +10 V, de tweede op -10 V. Als u de drukknop verbonden met de eerste spanningsbron indrukt, dan verschijnt er een puls van +10 V. Bij het indrukken van de tweede drukknop verschijnt er een puls van -10 V op de uitgang.

De gemeenschappelijke "SPRONG"-uitgang van de trainer wordt verbonden met de negatieve ingang van de op-amp. Deze ingang ligt bovendien door middel van de weerstand R1 aan de massa.



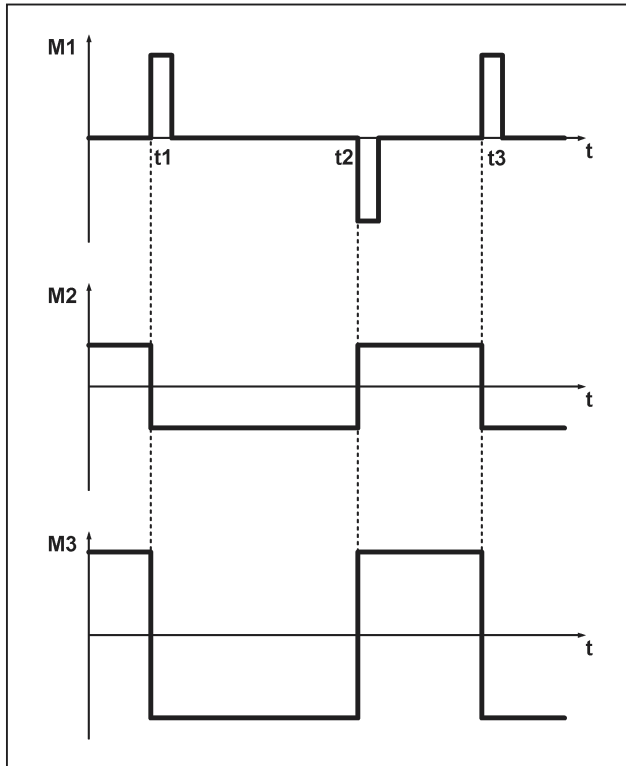
**Figuur 155:** Het basisschema van een flip-flop met een op-amp.

### Werking van de schakeling

Stel, zoals aangegeven in figuur 156, dat de uitgangsspanning van de op-amp bij het inschakelen van de voedingsspanning gelijk is aan de positieve voedingsspanning. De terugkoppeling zorgt ervoor dat de positieve ingang positief wordt ten opzichte van de negatieve ingang. Deze terugkoppeling zorgt dus voor het stabiliseren van de inschakelsituatie.

Voer nu door het indrukken van S1 op uw trainer een positief pulsje toe aan de negatieve ingang. De +10 V op deze ingang is positiever dan de +5 V op de positieve ingang, de op-amp klapt om. De uitgang gaat naar -10 V en de terugkoppeling zorgt ervoor dat de positieve ingang op -5 V komt te staan. De negatieve ingang is nog steeds positiever dan de positieve ingang, deze situatie is stabiel. Nu laat u de drukknop los. De negatieve ingang van de op-amp gaat naar massa. Maar

ook nu is deze ingang nog steeds positiever dan de -5 V spanning op de niet-inverterende ingang. De uitgang blijft dus op de negatieve voedingsspanning staan!



**Figuur 156:** De spanningsvormen in de schakeling.

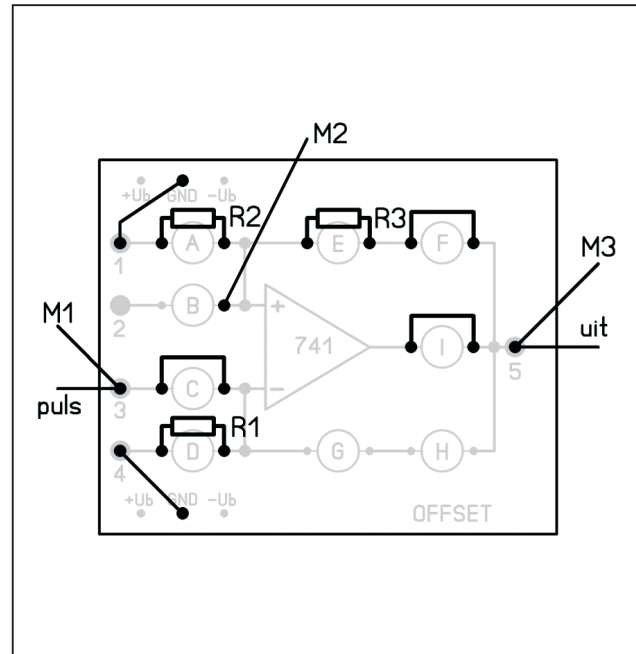
### Conclusie

Het aanleggen van een korte positieve puls op de negatieve ingang zorgt voor het omklappen van de uitgangsspanning van +10 V naar -10 V. De schakeling werkt als geheuelement, als flip-flop. Het zal duidelijk zijn dat u de schakeling weer in de beginstand kunt brengen door het op de negatieve ingang aanleggen van een negatief pulsje. Als we deze schakeling willen vatten in de terminologie van digitale schakelingen, kunnen we zeggen dat de op-amp als flip-flop voldoet aan de meest eenvoudige versie van de flip-flop: een S-R type, waarbij de set- en reset-functies op een en dezelfde ingang inwerken, maar tegengestelde polariteiten eisen.

Bij vergelijking met het groot aanbod aan digitale flip-flop's (R-S, D, J-K, etc.) heeft de op-amp dus maar beperkte gebruiksmogelijkheden.

### De schakeling op uw experimenteerprint

In figuur 157 hebben we de flip-flop uitgewerkt op uw experimenteerprint. Probeer eens op uw tweede experimenteerprint een identieke schakeling op te bouwen en deze te sturen uit de uitgang van de eerste flip-flop!










**Figuur 157:** De flip-flop op uw experimenteerprint.

### Werken met een waarheidstabel

Bij digitale schakelingen, zoals deze flip-flop, kunt u het verband tussen de in- en uitgangsgrootheden grafisch samenvatten in wat wordt genoemd "de waarheidstabel". In zo'n tabel vult u de actie op de ingang(en) in de eerste kolom(men) in en noteert de reactie van de uitgang in de laatste kolom. Deze flip-flop is een uitstekend hulpmiddel om u vertrouwd te maken met het begrip waarheidstabel. Op de laatste pagina van dit hoofdstuk staat de gedeeltelijk reeds ingevulde waarheidstabel van deze flip-flop. Wij hebben de acties op de ingangen ingevuld, het enige dat u moet doen is de reactie van de uitgang in de laatste kolom noteren.



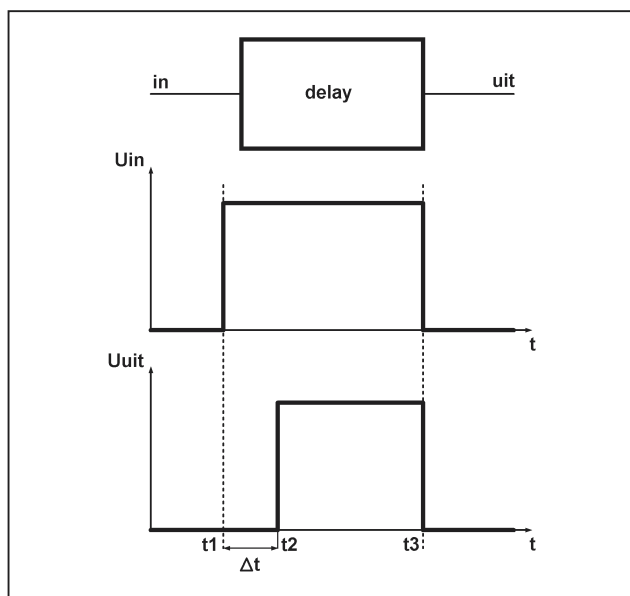
## VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!

actie S1	actie S2	reactie uitgang
		
		
		
		
		
		

## 28 De op-amp als vertrager

### Inleiding

Vertragingen (of delay's) worden vaak toegepast in de digitale elektronica. Een voorbeeld. Een inbraakalarm heeft een activeeringsknop. Drukt u die in, dan heeft u nog 20 seconden tijd om het pand te verlaten, alvorens het alarm afgaat. Deze vertraging wordt verzorgd door een delayschakeling. Er zijn diverse soorten vertragingsschakelingen. De eenvoudigste is getekend in figuur 158. Bij dit delay wordt alleen de voorflank van de puls met een tijd  $\Delta t$  vertraagd. In rust zijn in- en uitgang op massapotentiaal. Een positieve puls aan de ingang op tijdstip  $t_1$  resulteert in een vertraagde puls op tijdstip  $t_2$ . Als de ingangspuls op tijdstip  $t_3$  wegvalt, dan houdt echter ook de uitgangspuls het voor gezien.



**Figuur 158:** De werking van een delay: de voorflank van een puls wordt een tijd  $\Delta t$  vertraagd.

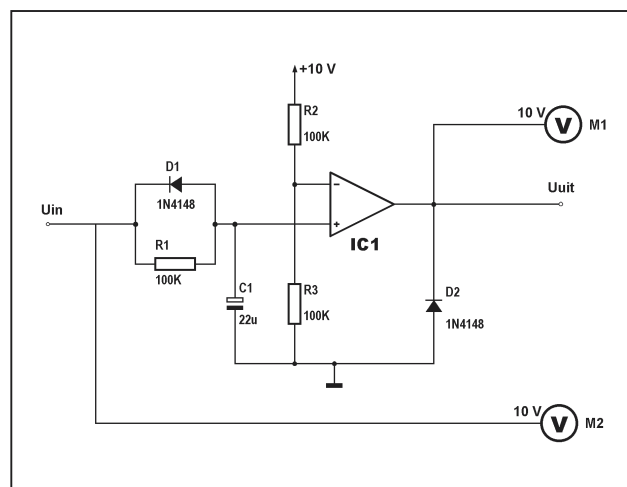
Er zijn delay's waarmee u niet alleen de voorflank, maar ook de achterflank van een puls kunt vertragen (de pulsbreedte blijft dan constant) en er zijn zelfs schakelingen waarmee u een korte puls in de tijd kunnen opschui-

ven. Met andere woorden: de ingangspuls is alweer verdwenen, alvorens de delay een uitgangspuls opwekt.

Volgens de klassieke digitale methode worden dit soort schakelingen opgebouwd met geïntegreerde monostabiele multivibratoren, zoals de 74121 voor TTL of de 4047 voor CMOS. Als u geen al te hoge eisen stelt aan de schakelsnelheid (dus werkt in een laagfrequente omgeving), dan kunt u delay's net zo eenvoudig met op-amp's opbouwen.

### Een pulsvertrager volgens figuur 158

Figuur 159 geeft een voorbeeld van een schakeling die de voorflank van een positieve puls met een instelbare tijd vertraagd.



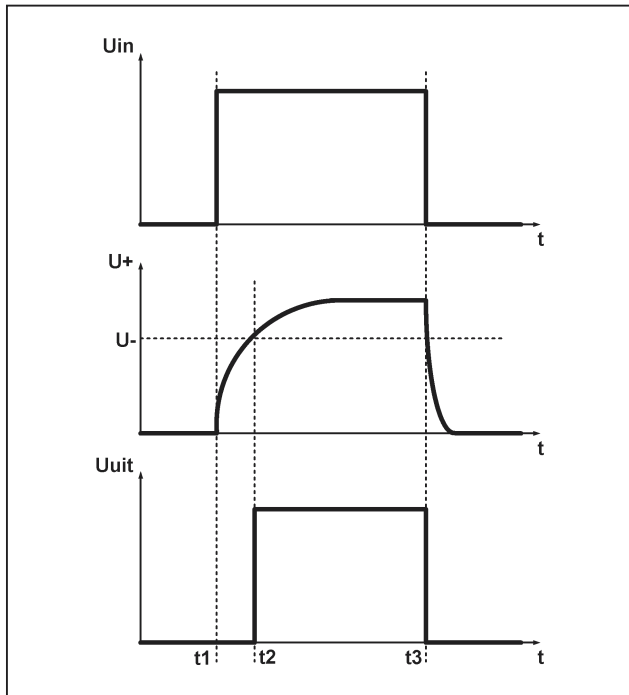
**Figuur 159:** Een delay, samengesteld uit een RC-integrator en een comparator.

De grafieken van figuur 160 geven uitsluitsel over de werking. De op-amp is in feite geschakeld als comparator. De drempelspanning wordt ingesteld op de helft van de positieve voedingsspanning door middel van de spanningsdeler R2-R3. Als deingangsspanning nul is, dan staat de negatieve ingang van het IC op een positievere spanning dan de niet-inverterende ingang. De uitgang zou de negatieve voedingsspanning opzoeken. Zou, want de diode D2 zorgt ervoor dat de



uitgang van de op-amp niet lager kan gaan dan  $-0,6\text{ V}$ . Dit is niet noodzakelijk, maar in de digitale elektronica werken we met standaardniveau's en daarbij is het meestal de gewoonte dat een "0" (L) overeenkomt met nul volt.

Let op! Niet ieder type op-amp laat toe dat u zijn uitgang met een diode kortsluit naar massa. De 741 kan onbegrensd worden kortgesloten, hierbij kan het dus wel.



**Figuur 160:** De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

### Werking van de schakeling

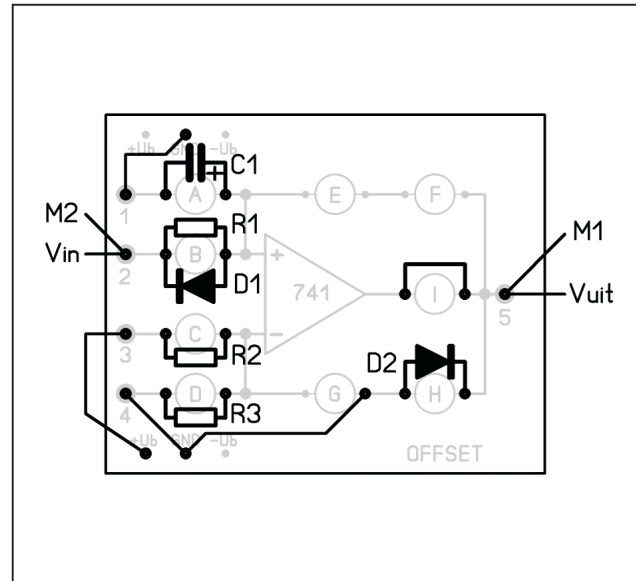
Stel dat op tijdstip  $t_1$  een positieve puls aan de ingang verschijnt. Door  $R_1$  loopt een stroom die de condensator  $C_1$  gaat opladen. De spanning op de positieve ingang stijgt. Op tijdstip  $t_2$  wordt de spanning op deze ingang gelijk aan de drempelspanning op de invertende ingang. De schakeling klapt om, de uitgang van de op-amp wordt positief. De tijdvertraging  $\Delta t$  wordt bepaald door de waarde van het RC-netwerk tussen de ingang van de schakeling en de niet-inverterende ingang van de op-amp.

Op tijdstip  $t_3$  verdwijnt de ingangspuls. De opgeladen condensator gaat nu dadelijk ontladen via de geleidende diode  $D_1$ . De spanning op de  $+IN$  wordt lager dan de drempel

op de  $-IN$ , de comparator klapt om. De uitgang gaat naar nul.

### Experimenteren

Bouw deze schakeling op de trainer volgens figuur 161 en experimenteer met de schakeling: hoe kunt u ook de achterflank vertragen, of hoe kunt u alleen de achterflank vertragen?



**Figuur 161:** De schakeling van de delay op uw experimenteerprint.

### Even een opmerking

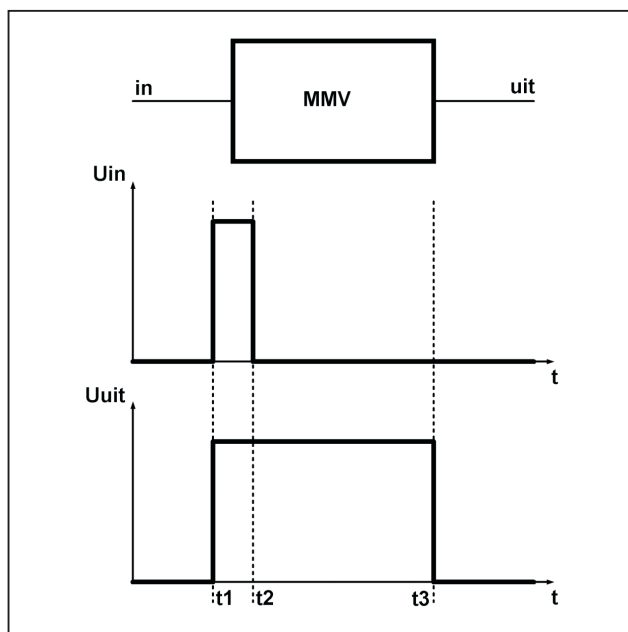
De "digitale" puls van  $0\text{ V}$  tot  $+10\text{ V}$  kunt u simuleren door een van de gelijkspanningspotentiometers op  $+10\text{ V}$  in te stellen en om te schakelen tussen  $10\text{ V}$  en  $1\text{ V}$  met de tuimelschakelaar. De spanning wijpt dan heen en weer tussen  $+10\text{ V}$  en  $+1\text{ V}$ , deze laatste waarde is laag genoeg om als "L" te worden geïnterpreteerd.

## 29 De op-amp als monostabiele multivibrator

### Inleiding

Een monostabiele multivibrator (MMV) is een schakeling, zie figuur 162, die op commando van een ingangspuls met willekeurige duur een uitgangspuls van constante, maar instelbare duur, opwekt. De pulsbreedte  $t_1$ - $t_3$  van de uitgangsspanning moet onafhankelijk zijn van de pulsbreedte  $t_1$ - $t_2$  van de startpuls.

Als u rekening houdt met de reeds bekende begrenzings van op-amp schakelingen in digitale toepassingen (alleen bruikbaar in systemen met lage werkfrequenties), kunt u MMV's met succes opbouwen met deze geïntegreerde versterkers.



**Figuur 162:** De basiswerking van een monostabiele multivibrator.

### De MMV op uw trainer

Figuur 163 geeft een op uw trainer op te bouwen voorbeeld van een schakeling die op bevel van een smalle positieve puls een bredere positieve puls opwekt. De ingangspuls kunt u weer simuleren door een van de gelijkspanningsbronnen van de trainer op +10 V in te stellen en de tuimelschakelaar te bedienen. Stand 1 V komt dan overeen met een lo-

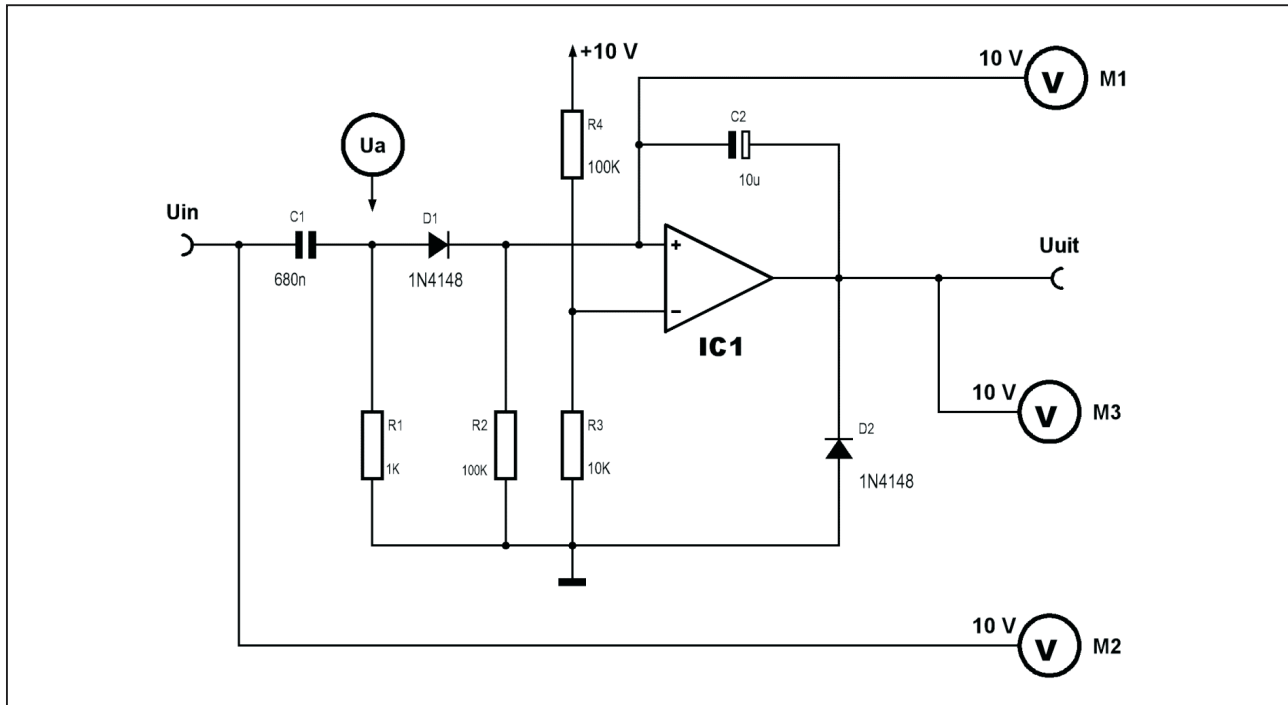
gische "L", stand 10 V met een logische "H". De op-amp werkt (alweer) als comparator. De negatieve ingang is door middel van de spanningsdeler R4-R3 ingesteld op een positieve spanning van ongeveer 1 V. Dat doet u om er zeker van te zijn dat in rust, dus zonder puls aan de ingang, ook de uitgang op 0 V staat. De diode D2 aan de uitgang zorgt voor het begrenzen van de negatieve uitgangsspanning van de op-amp op -0,6 V, gelijk aan logisch "L".

### De schakeling op uw experimenteerprinten

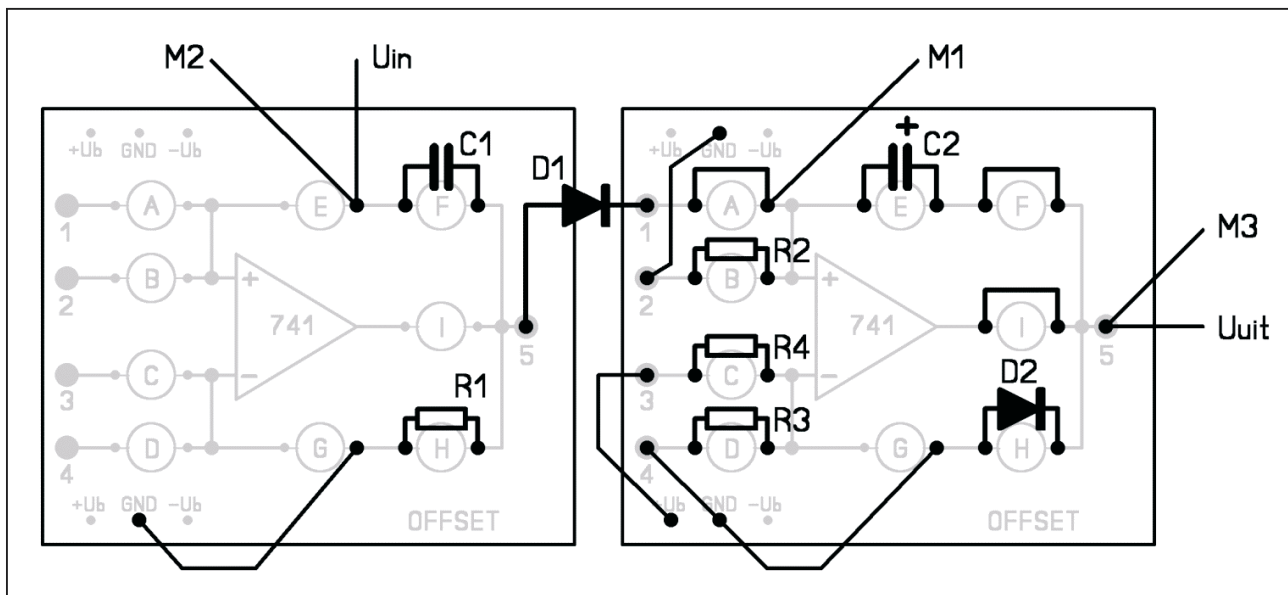
In figuur 164 is de schakeling op uw experimenteerprinten voorgesteld. Omdat er aan de positieve ingang van de op-amp zoveel componenten hangen, kunt u dat niet op één printje voor elkaar krijgen. U schakelt dus de tweede print in, die u in vorige hoofdstukken ook al nodig had. De linker print wordt alleen gebruikt als soldeerhulpmiddel om alle onderdelen kwijt te raken. De op-amp op deze print wordt uiteraard niet gebruikt. Vandaar dat op de plaats van de onderdelen E, G en I geen draadbrug aanwezig mag zijn.

### Werking van de schakeling

Aan de hand van figuur 165 kunt u de werking van de schakeling doorgronden. Op tijdstip  $t_1$  schakelt u de schakelaar op de trainer even om van 1 V naar 10 V. Er verschijnt een positieve puls op de ingang. Deze puls wordt door het RC-netwerkje C1-R1 gedifferentieerd. Alleen de snelle voor- en achterflank worden door de condensator doorgelaten. Over de weerstand ontstaan dus twee zeer smalle naaldpulsjes, een positief pulsje bij het verschijnen van de ingangspuls en een negatief pulsje bij het verdwijnen van het signaal. Het negatief naaldpulsje zijn we liever kwijt dan rijk, vandaar de diode D1, die alleen de positieve naald doorkoppelt naar de positieve ingang van de op-amp.



**Figuur 163:** Het basisschema van een monostabiele multivibrator.

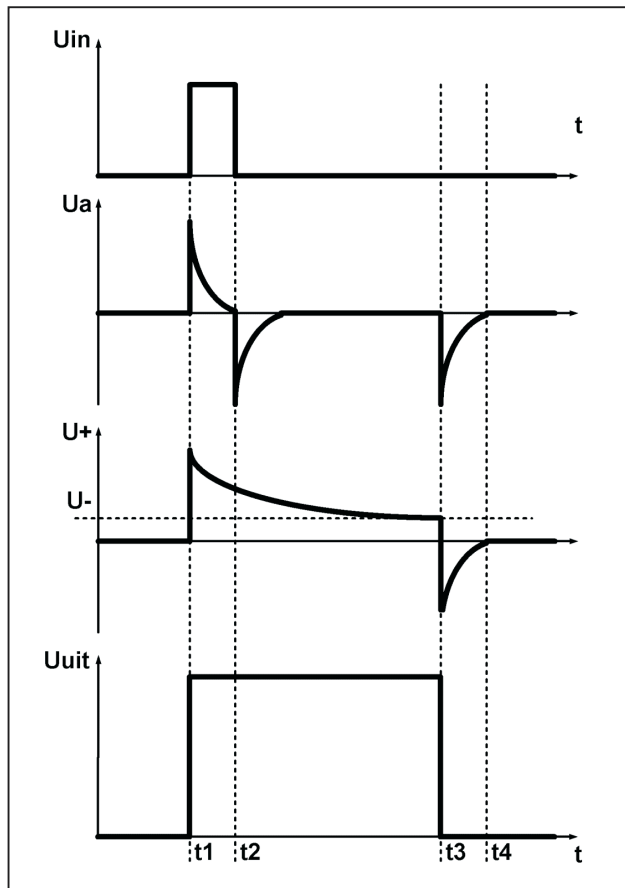


**Figuur 164:** De MMV op uw experimenteerprinten.

Op tijdstip  $t_1$  wordt de positieve ingang dus heel even veel positiever dan de negatieve ingang. De comparator reageert dadelijk, de schakeling klapt om en de uitgang wordt positief. Tussen de uitgang en de positieve ingang van de op-amp staat ook een differentiator geschakeld. De tijdconstante van de kring  $C2$ - $R2$  is echter zeer groot. De positieve flank van de uitgang wordt doorgekoppeld naar de positieve ingang. Door de grote tijdconstante van de kring gaat de elco zeer

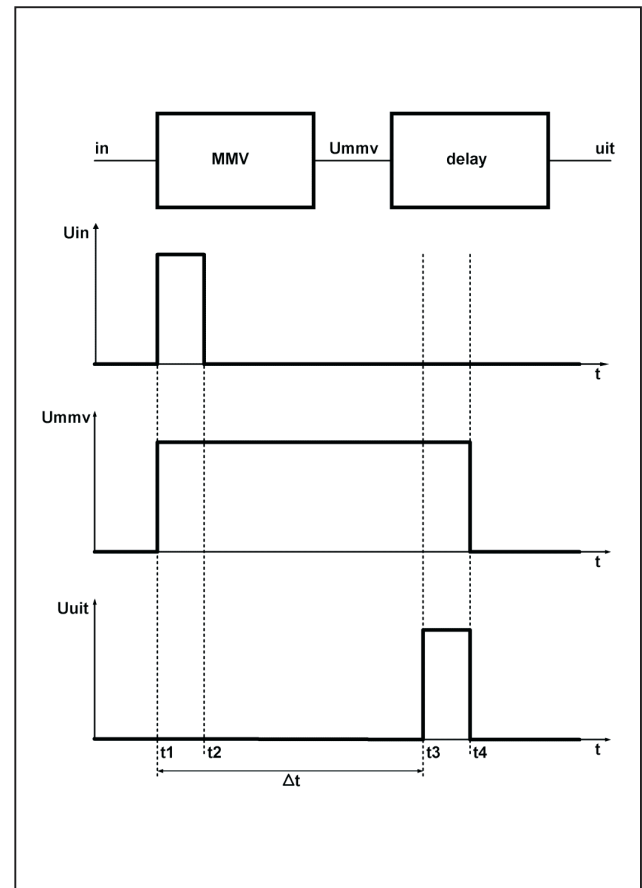
langzaam ontladen via  $R2$ . Gevolg: ook na het wegvallen van het smalle naaldpulsje, afgeleid van de ingang, blijft de positieve ingang van de op-amp positief. Ook de spanning op de uitgang van de schakeling blijft dus op logisch "H" staan.

De condensator  $C2$  gaat nu ontladen. De spanning op de positieve ingang daalt en na een bepaalde tijd wordt deze spanning gelijk aan de +1 V op de negatieve ingang. De comparator klapt om, de uitgang gaat naar



**Figuur 165:** De grafische verklaring van de werking van de schakeling.

nul (tijdstip  $t_3$ ). Ook deze negatieve sprong wordt door de elco doorgesluisd naar de positieve ingang. De spanning op dit punt gaat dus opeens naar -9 V. Deze spanning moet u zo snel mogelijk zien kwijt te raken. Immers, zou dit potentiaal zich even traag afbouwen (via het ontladen van C2 door R2) als de positieve spanning na  $t_1$ , dan zou het een hele tijd duren alvorens de schakeling reageert op de nieuwe ingangspuls. De korte positieve naaldpuls, afgeleid van deze nieuwe ingangspuls, zou dan verdrinken in de hoge negatieve spanning op de positieve ingang van de op-amp en de schakeling zou geen uitgangspuls opwekken. Gelukkig gaat D1 nu geleiden, want de kathode is negatief ten opzichte van de anode. De negatieve spanning op de positieve ingang van de op-amp vloeit dus zeer snel af via D1 en R1. Vandaar op tijdstip  $t_3$  een smal negatief pulstje op Ua. Het is dus van belang de waarde van R1 zo laag mogelijk te kiezen. Op tijdstip



**Figuur 166:** Met de combinatie MMV plus delay kunt u een ingangspuls "in de tijd verschuiven".

$t_4$  is de condensator ontladen, de schakeling is in rust en bereid een nieuwe monostabiele puls op te wekken.

### Een toepassing van een MMV





Een toepassing van de combinatie MMV-delay geeft figuur 166. Een korte positieve ingangspuls moet een bepaalde tijd vertraagd worden. De vertragingstijd is groter dan de duur van de ingangspuls. Door middel van de in dit experiment beschreven MMV zet u de ingangspuls om in een bredere puls. Nadien gaat u de voorflank van deze puls vertragen met de in het vorig hoofdstuk beschreven delay-schakeling. Door de juiste keuze van de tijdbepalende onderdelen kunt u er voor zorgen dat de vertraagde puls net zo breed is als de oorspronkelijke puls.



## 30 De op-amp als poort

### Inleiding

Poorten zijn dé basisschakeling van de digitale techniek. Wie heeft er nog nooit met een NAND-je of een OR-tje gewerkt? IC's als de 7400 of de 4011 zijn voor geen enkele elektronicus onbekend. Er zijn vier basispoorten, AND, NAND, OR en NOR. De waarheidstabel van de tabel in figuur 167 geeft het verband tussen de twee ingangsgrootheden en de uitgang van iedere poort.

ingangen		uitgang			
A	B	AND	NAND	OR	NOR
L	L	L	H	L	H
H	L	L	H	H	L
L	H	L	H	H	L
H	H	H	L	H	L
symbool					

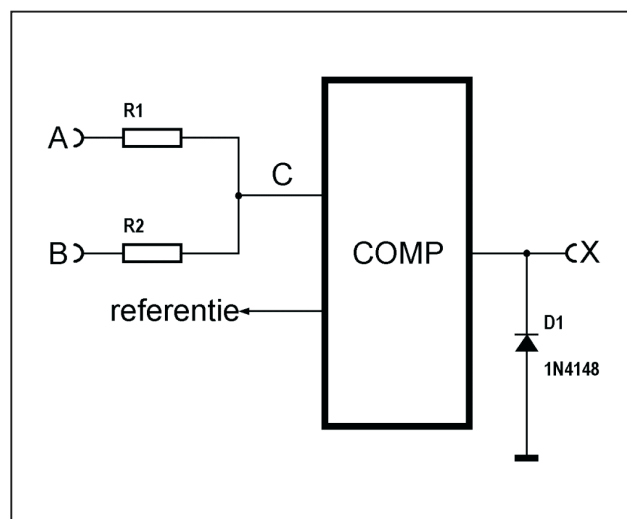
**Figuur 167:** De waarheidstabel van de vier basispoorten van de digitale techniek.

Alle vier de poorten kunt u met op-amp's samenstellen. En dat wel met één basisschakeling! Als u dus in een of ander systeem diverse soorten poorten door elkaar moet gebruiken, kan het voordelig zijn een beroep te doen op op-amp's. Weliswaar kunnen we ook met NAND's of NOR's alle basispoorten opbouwen, maar dat vereist meestal een groot aantal poorten.

Uiteraard geldt bij het gebruik van op-amp's de bekende begrenzing: niet bruikbaar in systemen die met hogere frequenties dan enige kHz werken. Vaak treft u in bijvoorbeeld een inbraakalarm systeem een brokje logica aan, opgebouwd uit een aantal poorten. In zo'n traag systeem kunt u zonder meer op-amp's toepassen als dat voordelig uitkomt.

### Het principe

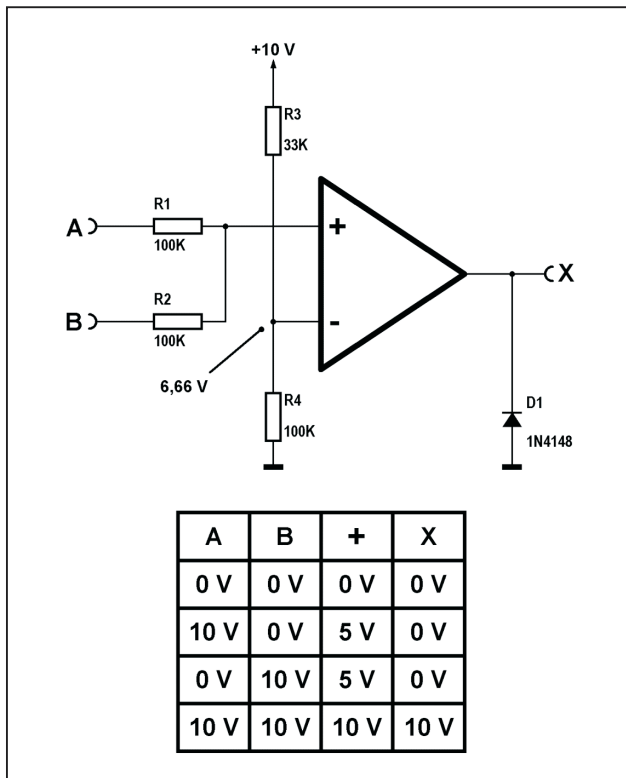
Het basisschema van een op-amp poort bestaat uit een spanningsdeler en een comparator. In figuur 168 is de spanningsdeler R1-R2 getekend. De twee ingangen A en B zijn verbonden met de twee ingangssignalen. Het knooppunt van beide weerstanden (C) gaat naar de ingang van de als comparator geschakelde op-amp. De tweede ingang van de comparator wordt aangesloten op een referentiespanning.



**Figuur 168:** Het principe van de op-amp als digitale poort.

Hoe werkt een en ander? De spanning die u op punt C meet zegt u iets over de binaire combinatie van "H" en "L" op de beide ingangen. Het zal duidelijk zijn dat C "L" is als A en B "L" zijn. Het niveau "L" komt immers overeen met 0 V en 0 V op A en B levert 0 V op het knooppunt van beide weerstanden. Als één van beide ingangen "H" is, dan staat er op punt C een spanning van +5 V. Er wordt dan immers een spanningsdeler gevormd tussen 0 V en +10 V en daar beide weerstanden even groot zijn staat er tussen beide weerstanden de helft van de spanning. Als beide ingangen "H" zijn, dan staat er uiteraard +10 V op C.





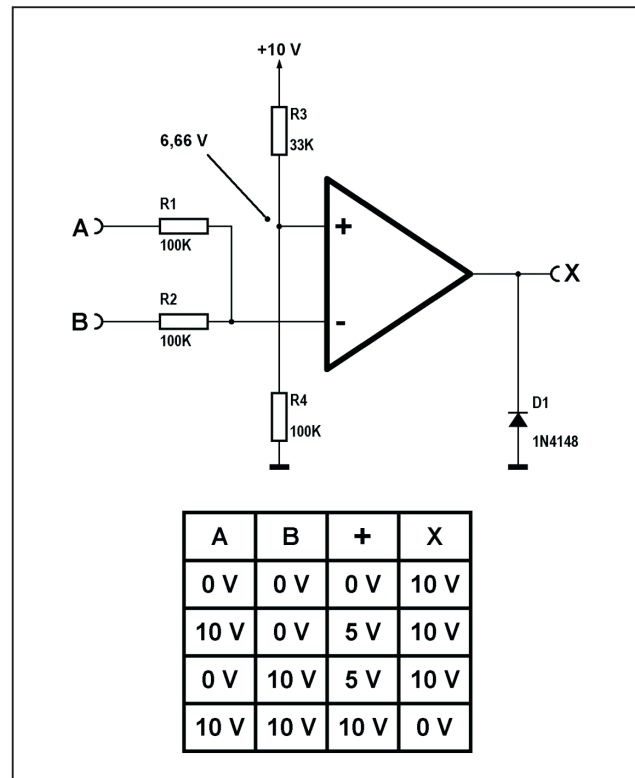
**Figuur 169:** Het schema van een AND met een op-amp.

Op punt C staat dus 0 V, +5 V of +10 V, afhankelijk van de logische combinatie op de twee ingangen. De comparator zorgt ervoor dat we deze informatie omzetten naar een eenduidige “L” of “H” op de uitgang, afhankelijk van de gewenste poortschakeling. De diode aan de uitgang van de comparator zorgt er weer voor dat de spanning op de uitgang niet lager kan worden dan -0,6 V.

Op deze wel zeer eenvoudige manier kunt u de vier basispoorten met één op-amp uitvoeren.

### De AND-poort

Het schema van de AND-poort is gegeven in figuur 169. De twee ingangen gaan via de spanningsdeler weerstanden naar de positieve ingang van de op-amp, de negatieve ingang is aangesloten op een drempelspanning van +6,66 V middels de spanningsdeler R3-R4. De werking van de schakeling is duidelijk. Als beide ingangen “L” zijn, dan staat op de positieve ingang een spanning van 0 V. De spanning op de negatieve ingang is groter, de uitgang van de comparator is -0,6 V, dus logisch “L”. Is een van de ingangen “H”,



**Figuur 170:** Het schema van een NAND met een op-amp.

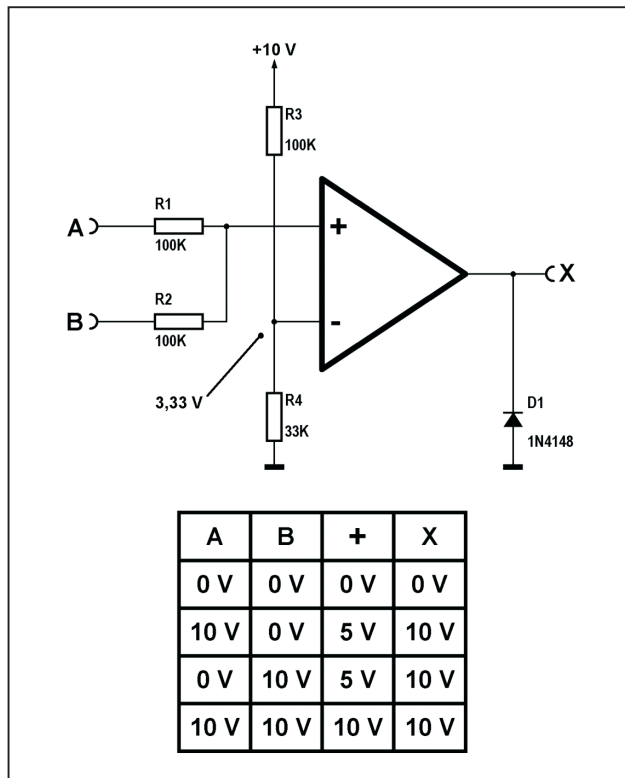
dan wordt de positieve ingang ingesteld op een spanning van +5 V, hetgeen niets aan de situatie wijzigd. Slechts als beide ingangen “H” zijn, wordt de spanning op de positieve ingang groter dan de spanning op de negatieve ingang en slaat de comparator om. De uitgang wordt +10 V, oftewel logisch “H”. De schakeling voldoet aan de waarheidstabel van een AND-poort.

### De NAND-poort

Het schema van de NAND staat in figuur 170. Het enige verschil is dat beide ingangen zijn omgewisseld. De positieve ingang van de comparator staat op een drempel van +6,66 V. Zolang niet beide ingangen “H” zijn, is de spanning op de negatieve ingang kleiner dan de drempel, de uitgang is “H”. Eerst als beide ingangen “H” worden, slaat de comparator om. De waarheidstabel verwijst dus naar de NAND-functie.

### De OR-poort

De OR-poort, waarvan het schema is getekend in figuur 171, is al net zo simpel. Beide ingangen gaan naar de positieve ingang, de



**Figuur 171:** Het schema van een OR met een op-amp.

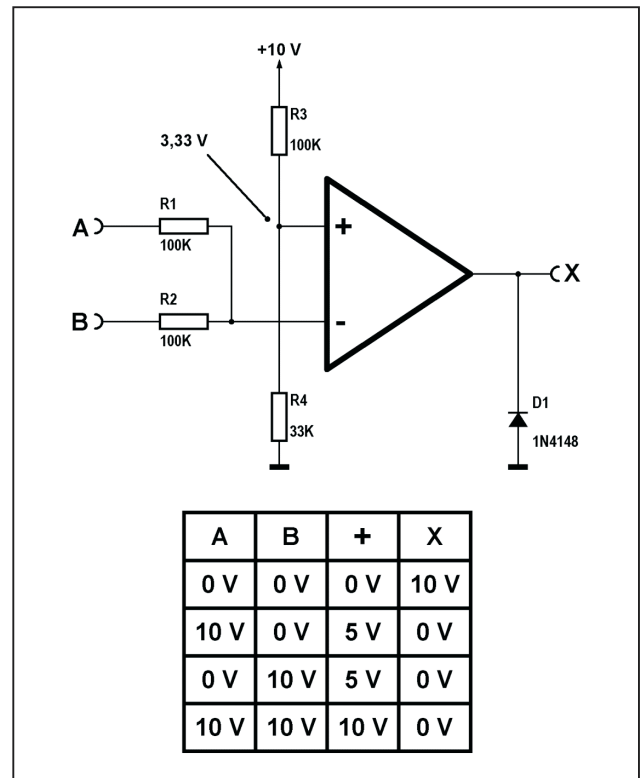
negatieve is ingesteld op een drempel van +3,33 V. Nu is het voldoende dat er op één van de beide ingangen een “H” verschijnt om de comparator te laten omklappen. Hetgeen zeer duidelijk de OR-functie demonstreert.

### De NOR-poort

Het zal geen verbazing wekken dat het enige verschil tussen de OR en de NOR van figuur 172 de wisseling is van beide ingangen. Alleen als beide ingangen “L” zijn, staat er op de negatieve ingang een lagere spanning dan op de positieve ingang. De uitgang is dan “H” en zoekt het “L”-niveau op als een of beide ingangen “H” worden. Een typisch NOR gedrag!

### Conclusie

Met vier weerstanden en één op-amp heeft u een basisschakeling waarmee u alle basis poortfuncties kunt uitwerken. Als u dus een 3 x 4 standen schakelaar toevoegt, waarmee u de ingangen wisselt en de referentiespanning omschakelt van +3,33 V naar +6,66 V, heeft u een zeer eenvoudige logische demonstrator, waarmee u alle poortfuncties



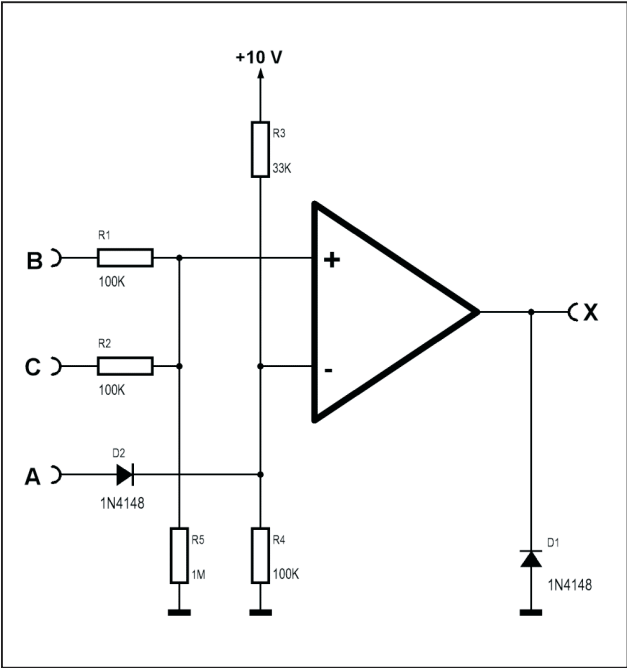
**Figuur 172:** Het schema van een NOR met een op-amp.

kunt uitproberen. Aap dat maar eens na met TTL- of CMOS-poorten!

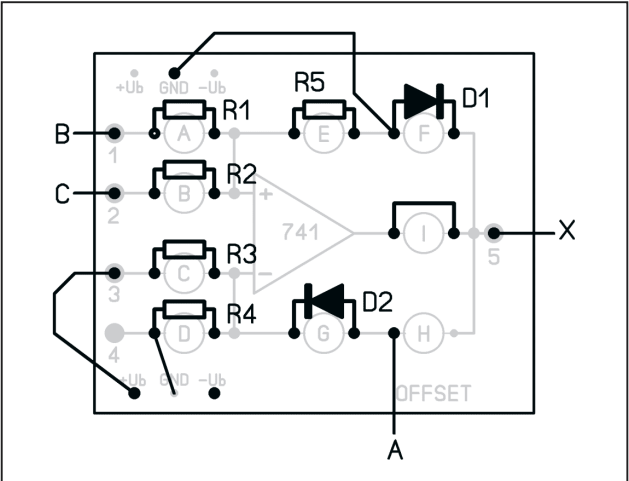
### Ingewikkelder schakelingen

Figuur 173, tenslotte, geeft een op-amp poortschakeling met drie ingangen A, B en C. De uitgang X mag alleen “H” worden als A = “L” en B en C = “H”. Een typische decodeerschakeling, waar een op-amp zijn (of haar?) hand niet voor omdraait! U kunt deze schakeling volgens figuur 174 opbouwen op uw experimenteerprint.

Op de laatste pagina hebben wij een half lege waarheidstabel gegeven, u hoeft alleen maar voor iedere combinatie van A, B en C de logische waarde van X in te vullen.



**Figuur 173:** Ook ingewikkelder decodeerschakelingen kunt u vaak zeer eenvoudig met een op-amp'je uitwerken.



**Figuur 174:** De schakeling van figuur 173 op uw experimenteerprint.

VUL HIER UW EIGEN MEETRESULTATEN IN!

A	B	C	X
"L"	"L"	"L"	
"H"	"L"	"L"	
"L"	"H"	"L"	
"H"	"H"	"L"	
"L"	"L"	"H"	
"H"	"L"	"H"	
"L"	"H"	"H"	
"H"	"H"	"H"	

## 31 De op-amp als tiptoets

### Inleiding

Steeds vaker worden oude mechanische componenten, zoals relais en schakelaars, vervangen door vol-elektronische systemen. Een typisch voorbeeldje is de drukknop schakelaar. In steeds meer apparatuur treft u elektronische tiptoetsen aan, niet alleen omdat dit een modetrend is, maar wel degelijk ook omdat het goedkoper en betrouwbaarder is.

Een tiptoets wordt meestal uitgevoerd met een of meerdere CMOS-poorten. De zeer hoge ingangsimpedantie van die dingen is ideaal voor dit gebruik. Er zijn twee systemen. De minst volmaakte werkt op de huidweerstand van een vinger. Als u met uw vingertop contact maakt tussen twee elektroden, dan wordt er een weerstandje van een paar M $\Omega$  opgebouwd en die weerstand kunt u gebruiken voor het opwekken van een spaninkje. De nadelen zijn evident: de contacten kunnen vervuilen door huidsmeer en andere viezigheid en het contact werkt niet betrouwbaar meer.

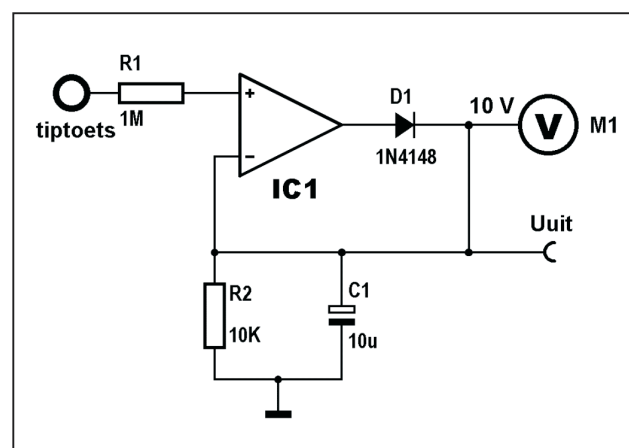
Het betere systeem maakt gebruik van de in ieder menselijk lichaam aanwezige 50 Hz inductiespanning, opgepikt uit het alom aanwezig magnetisch veld van de netspanningsbedrading. Als u met een vingertop een geleider aanraakt die een zeer hoge weerstand heeft ten opzichte van de massa, dan wordt er in die geleider een 50 Hz wisselspanning opgebouwd van wel enige tientallen volts. Die spanning kunt u gebruiken voor het sturen van een tiptoetsschakeling.

Operationele versterkers hebben ook een zeer hoge ingangsimpedantie. Het ligt dus voor de hand aan te nemen dat zij ideaal zijn voor het opbouwen van tiptoetsen.

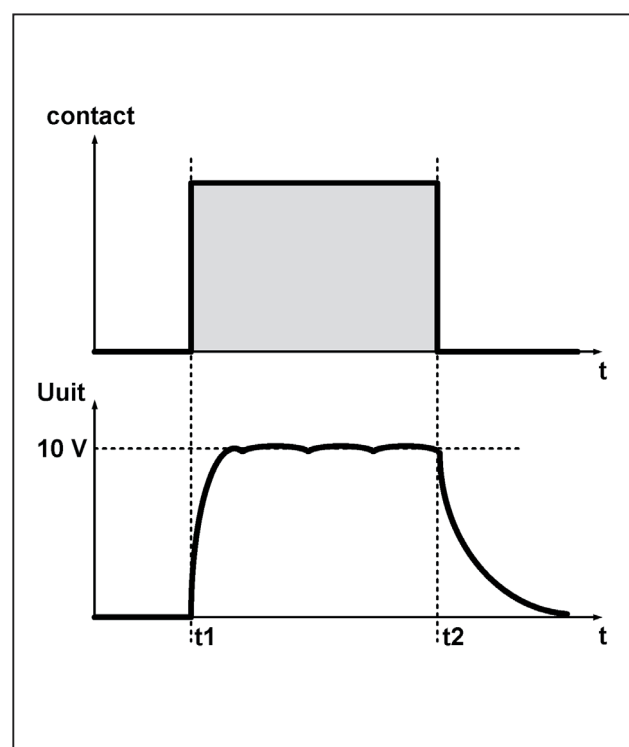
### Het schema

Dat klopt, kijk maar naar figuur 175. U herkent het basisschema van de topdetector uit hoofdstuk 21. De tiptoets (u kunt bijvoorbeeld

een messing sierspijker met ronde kop gebruiken) gaat via een beveiligingsweerstand van 1 M $\Omega$  naar de positieve ingang van de op-amp. Tussen de uitgang en de inverterende ingang staat het reeds bekende topdetectie circuit.



**Figuur 175:** Het schema van de tiptoets met een op-amp.

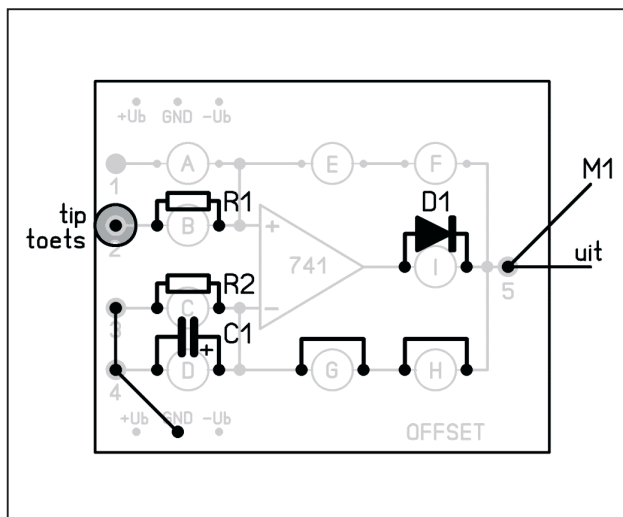


**Figuur 176:** De spanningen in de schakeling.

Als u de spijker aanraakt, dan verschijnt er op de positieve ingang van de op-amp een 50 Hz wisselspanning van ongeveer 10 V. Deze spanning wordt gelijkgericht en op de uitgang verschijnt een positieve puls van +10 V. Deze is zonder meer geschikt voor het aansturen van andere schakelingen. In figuur 176 is de werking van de schakeling grafisch toegelicht.

## De tiptoets op uw trainer

In figuur 177 is het schema van de tiptoets uitgewerkt naar de bedrading op uw experimenteerprint. Kan het nog eenvoudiger?



**Figuur 177:** De tiptoets op uw experimenteerprint.

## 32 Geen einde, maar hopelijk een begin!

### Dertig experimenten

In dertig experimenten hebben we een aantal praktische toepassingen van operationele versterkers belicht, die niet allemaal dadelijk voor de hand liggen. Wij hopen dat u er net zoveel plezier aan heeft beleefd als de auteur.

Een belangrijk toepassingsgebied van de op-amp is niet behandeld: filters. Laagdoorlaat filters, hoogdoorlaat filters, spier filters, band filters, anti-alias filters, de moderne analoge elektronica barst van de filtertoepassingen waarvoor steeds operationele versterkers worden gebruikt. De mogelijkheden van uw universele op-amp trainer, met zijn zeer lage frequentie generator, laten echter niet toe dit soort schakelingen op te bouwen en te testen.

Tot besluit enige opmerkingen. De op de trainer opgebouwde schakelingen zijn aangepast aan het frequentiebereik van het apparaat. Vaak zal het noodzakelijk zijn weerstanden en condensatoren heel anders te berekenen als u een schakeling "in het veld" gaan toepassen. We hopen echter dat wij u met deze reeks experimenten een goede basis hebben gegeven voor het zonder angst zélf experimenteren met schakelingen. Een functiegenerator en een scoop zijn dan echter wel zeer noodzakelijk!

### Hoe nu verder?

Moet uw dure universele op-amp trainer nu worden bijgezet in de "lijkenkist"? Zeer zeker niet, het apparaat heet niet voor niets "universeel"! Tot onze verbazing hebben wij het apparaat zeer vaak gebruikt bij het normale laboratoriumwerk. Hoe vaak gebeurt het immers niet dat u even snel een instelbaar gelijkspanningskijktje nodig heeft voor het sturen van een schakeling. Het even aansluiten van de analoge trainer is dan simpeler dan met behulp van spanningsdelertjes, aangesloten op de laboratoriumvoeding, de nodige stuur-

spanning opwekken. Ook de drievoudige spanningsmeetmogelijkheid is al vaak van pas gekomen.

### Andere analoge IC's

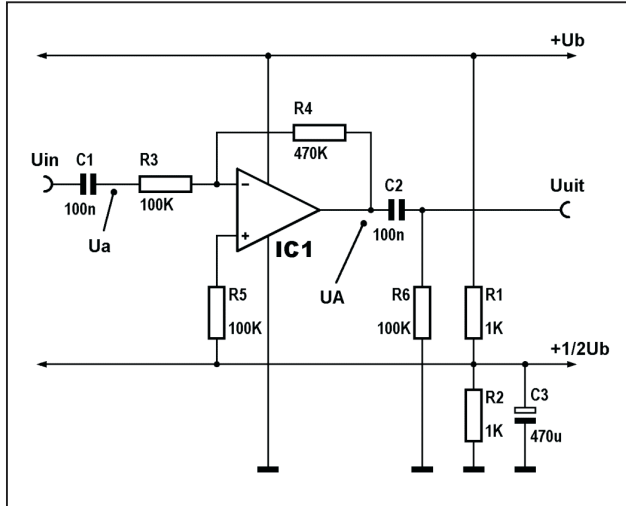
Vergeet bovenal niet dat er een heleboel analoge IC's zijn die u met de trainer kunt testen en leren kennen. Een typisch voorbeeldje. Er bestaan OTA's (operational transconductance amplifiers), die bijvoorbeeld bij spanningsgestuurde versterkers, oscillators en filters worden toegepast. Het bouwen van de op-amp trainer was voor de auteur de aanleiding dit soort schakelingen eens echt helemaal te gaan onderzoeken. Wie de trainer heeft gebouwd, heeft steeds een analoge IC-tester binnen handbereik! Het enige dat u moet doen is voor ieder IC een experimenteerprintje ontwerpen.

### Naar asymmetrische voeding

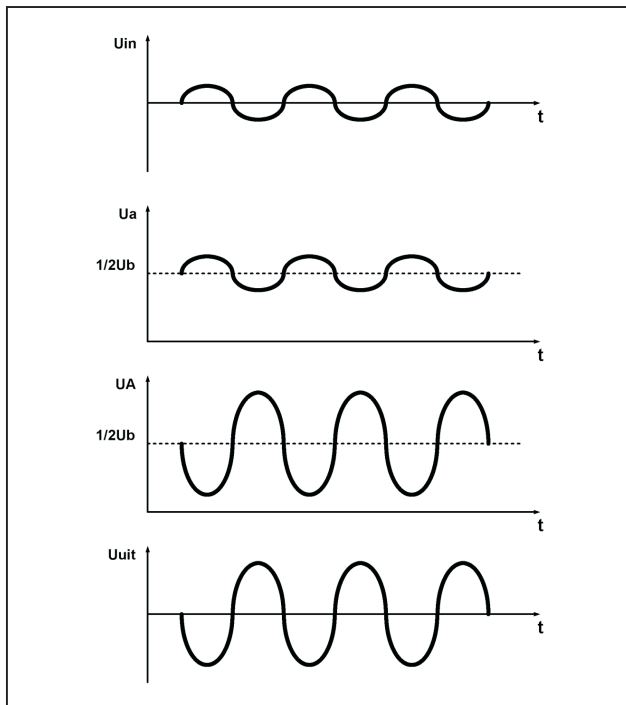
Alle opgebouwde schakelingen zijn symmetrisch gevoed: een positieve voedingsspanning van +10 V en een negatieve voeding van -10 V. Vaak heeft u in de praktijk echter de beschikking over slechts één positieve voedingsspanning. De meeste besproken schakelingen kunnen zonder meer omgebouwd worden naar een enkele voeding. Een voorbeeld geeft figuur 178, een inverterende versterker. De negatieve voedingsaansluiting van het IC wordt verbonden met de massa, de positieve gaat naar de beschikbare +Ub. Door middel van een spanningsdeler R1-R2, twee even grote weerstanden, wekt u een hulpspanning op die gelijk is aan de helft van de beschikbare voedingsspanning. Dit wordt dan de nieuwe "massa" van het systeem, ook wel "virtuele" massa genoemd. Het lijkt dan alsof u de +Ub heeft opgesplitst in twee even grote deelspanningen. Als  $+\frac{1}{2}U_b$  gelijk wordt gesteld aan 0 V, dan is de "massa" gelijk aan  $-\frac{1}{2}U_b$  en +Ub gelijk aan  $+\frac{1}{2}U_b$ . De symmetrische toestand is her-



steld. Alle onderdelen die in de behandelde schema's naar de massa gaan, moeten nu worden verbonden met het nieuw gecreëerde virtuele massapotential.



**Figuur 178:** Een voorbeeld van het gebruik van een op-amp als maar één positieve voedingsspanning ter beschikking staat.



**Figuur 179:** Het verloop van de spanningen in de schakeling van figuur 178.

Aan de hand van figuur 179 kunt u de werking van de schakeling doorgronden. De positieve ingang van de op-amp is verbonden met  $+1/2 U_b$  en deze spanning zult u, zonder signaal op de ingang, ook terugvinden op de

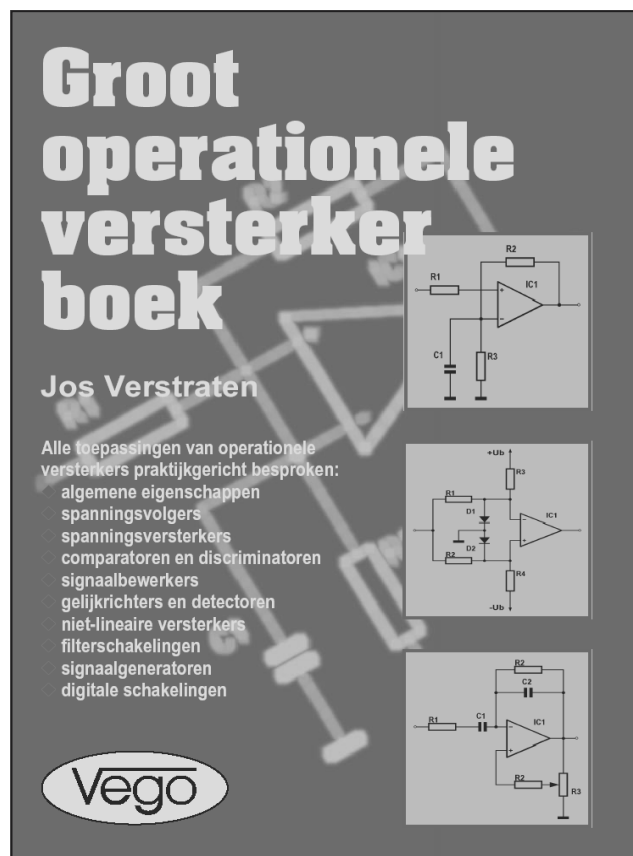
negatieve ingang en de uitgang. Deze instelspanning kan immers, door het gebruik van een scheidingscondensator C1, niet afvloeien en de op-amp werkt als spanningsvolger. Een wisselspanning op de ingang wordt door C1 doorgekoppeld naar de negatieve ingang. De spanning op punt A zal gaan variëren rond de instelspanning. Door R3 gaat dus een wisselstroom vloeien. De op-amp houdt de spanning op de negatieve ingang echter gelijk aan die op de positieve ingang. De stroom door R3 vloeit ook door R4. Over deze laatste weerstand wordt een spanning opgewekt (variërend rond  $1/2 U_b$ ), die u op de uitgang terugvindt. De instelspanning wordt door middel van C2 in de schakeling vastgehouden.

Op de uitgang staat de geïnverteerde en versterkte ingangswisselspanning.

Een nadeel van dit systeem is dat u koppelcondensatoren tussen de diverse trappen van een systeem moet gebruiken. Gelijkspanningen kunnen dus niet zonder meer worden verwerkt! Het zal verder duidelijk zijn dat u het netwerkje R1-R2-C1 slechts éénmaal moet opbouwen. Alle op-amp's in een schakeling kunnen met deze ene hulpspanning ingesteld worden.

### Meer lezen over op-amp's

Als u de smaak van op-amp's te pakken heeft gekregen kunnen wij u de aanschaf van het boek "Groot operationele versterker boek" van dezelfde auteur en van dezelfde uitgeverij aanbevelen. In dit boek, zie figuur 180, wordt dieper ingegaan op alle toepassingen waarmee u in dit boek heeft kennis gemaakt. Het is geen experimenteer boek, maar een studie boek. In het boek dat u nu leest heeft u in hoofdstuk 6 kennis gemaakt met de inverterende versterker. Wij hebben slechts één praktische schakeling behandeld. In het "Groot operationele versterker boek" krijgt u tien schakelingen van inverterende versterkers en wordt dieper ingegaan op de eigenschappen. Kortom, dat boek is een handig bezit als u dieper op de behandelde materie wilt ingaan. Bovendien wordt in dat boek ook het heel belangrijke onderwerp "filter schakelingen" zeer uitgebreid besproken.



**Figuur 180:** Aanbevolen vervolg literatuur: het "Groot operationele versterker boek".

Het "Groot operationele versterker boek" bevat de volgende hoofdstukken:

- Algemene eigenschappen;
- Op-amp's als spanningsvolgers;
- Op-amp's als spanningsversterkers;
- Op-amp's als comparatoren en discriminatoren;
- Op-amp's als signaal bewerkers;
- Op-amp's als gelijkrichters en detectoren;
- Op-amp's als niet lineaire versterkers;
- Op-amp's als filter schakelingen;
- Op-amp's als signaal generatoren;
- Op-amp's als digitale schakelingen.

Wat praktische gegevens:

- Uitgever: Vego VOF
- Auteur: Jos Verstraten
- A4 dubbelzijdig, gebonden
- 210 pagina's, 302 illustraties
- ISBN-10: 90-805610-3-7
- ISBN-13: 978-90-805610-3-8
- NUR: 959
- SISO: 663.15
- Prijs: € 25,75 exclusief 6 % BTW en verzending

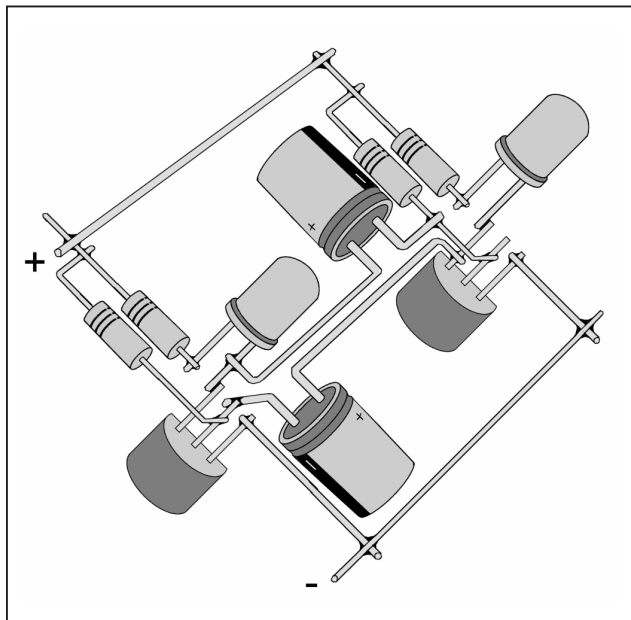


**Figuur 181:** "Takkenbos elektronica" van Willem H. M. van Dreumel.

### Meer lezen over experimenteren

Als u bovendien het experimenteren met elektronische schakelingen als zinvolle hobby heeft ontdekt, kunt u verder aan de slag met het boek "Takkenbos elektronica". In dit boek worden niet alleen experimentjes met op-amp's besproken, maar komen ook transistoren en andere geïntegreerde schakelingen, zoals timers en tellers, aan de orde. Dit boek, voorgesteld in figuur 181, is geen theorieboek. Hoewel er wel aandacht aan de achtergrond wordt besteedt, wordt niet veel verder gegaan dan de wet van Ohm en enkele andere simpele berekeningen. Het uitvoeren van de projecten vraagt weinig achtergrondkennis. Toch is de opbouw gestructureerd als in een leerboek. Vanuit eenvoudige één-transistor schakelingen komen de meest gebruikte elektronica basisschakelingen aan bod in herkenbare toepassingen. Bovendien wordt de analogie tussen diverse technologieën zichtbaar door basisschakelingen te presenteren in discrete onderdelen, maar ook uitgevoerd in verschillende geïnte-

greerde technologieën. Hierdoor is het boek ook geschikt voor de onderwijssituatie. Het boek maakt geen gebruik van experimenteerprintjes, maar van de “takkenbos”-techniek. Hierbij soldeet u de onderdelen rechtstreeks aan elkaar. In figuur 182 is een voorbeeldje uit dit boek gegeven.



**Figuur 182:** Een door de auteur Willem H. M. van Dreumel prachtig getekend experimentje uit “Takkenbos elektronica”.

Wat praktische gegevens:

- Uitgever: Vego VOF
- Auteur: Willem H. M. van Dreumel
- Werkboek uitvoering: A4 enkelzijdig, stevig geplastificeerd omslag, metalen ringband
- 85 pagina's, 140 illustraties
- ISBN-10: 90-805610-5-3
- ISBN-13: 987-90-805610-5-2
- NUR: 468
- SISO: 663.49
- Prijs: € 26,25 exclusief 6 % BTW en verzending

## 33 De ontwerpen van de print- en frontplaten

### Beschikbaar via internet

Voor het succesvol nabouwen van de universele op-amp trainer heeft u drie printplaten en twee frontplaten nodig:

- de hoofdprint van de trainer;
- de voedingsprint van de trainer;
- de experimenteerprint;
- de frontplaat van de trainer;
- het frontplaatje van de experimenteerprint.

Om het u zo gemakkelijk mogelijk te maken kunt u deze vijf ontwerpen downloaden van onze internetsite.

### Stap 1:

#### [www.vego.nl/boeken](http://www.vego.nl/boeken)

Ga naar de internetpagina van de uitgever [www.vego.nl/boeken](http://www.vego.nl/boeken). U ziet op deze indexpagina, zie figuur 183, een overzicht van alle

door Vego VOF uitgegeven boeken. Zoek dit boek op en klik op de knop “Klik hier .. voor meer informatie, prijs en on-line bestellen”.

### Stap 2:

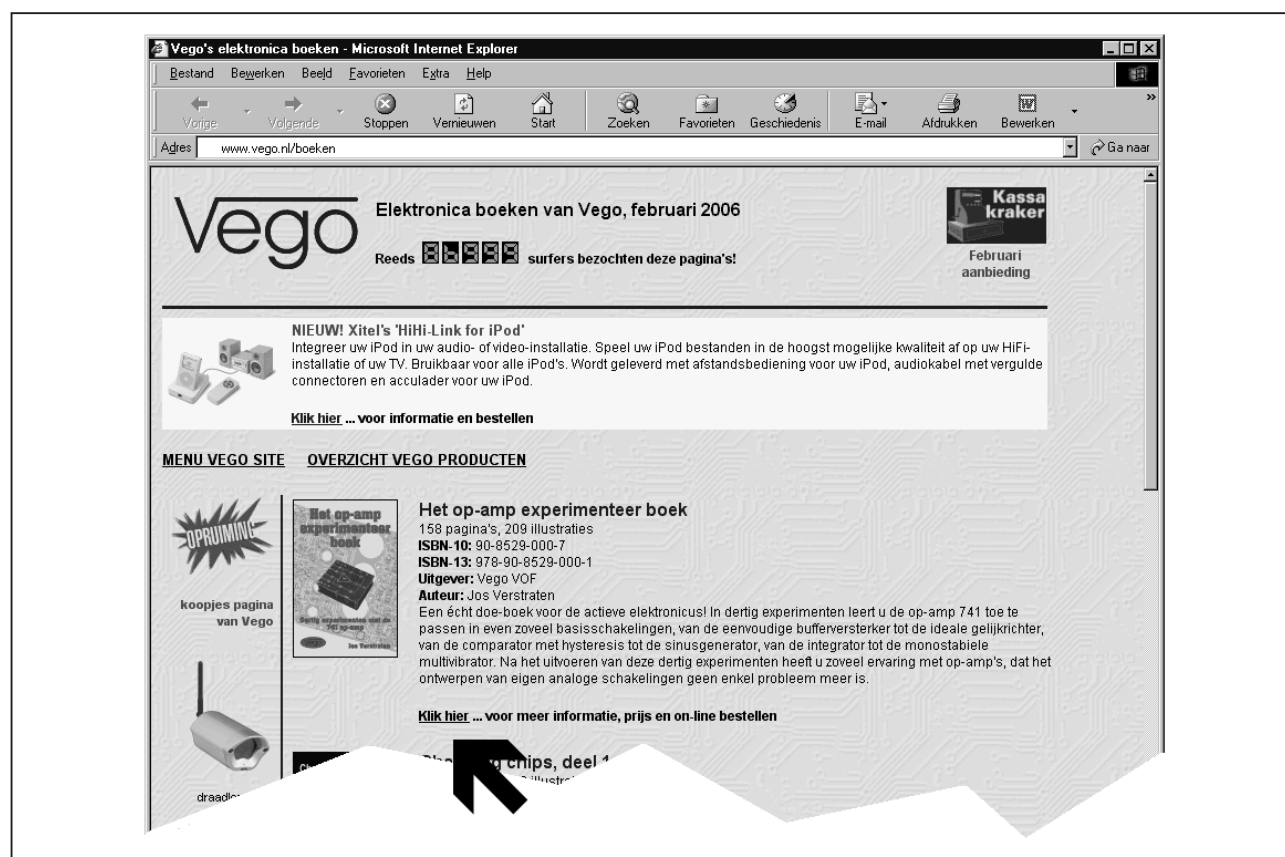
#### **Naar de pagina van dit boek**

U komt dan terecht op de bestelpagina van dit boek, zie figuur 184. Onder de titelstreep ziet u vier links, klik de meest rechtse link “DOWNLOAD PRINTEN EN FRONTEN” aan.

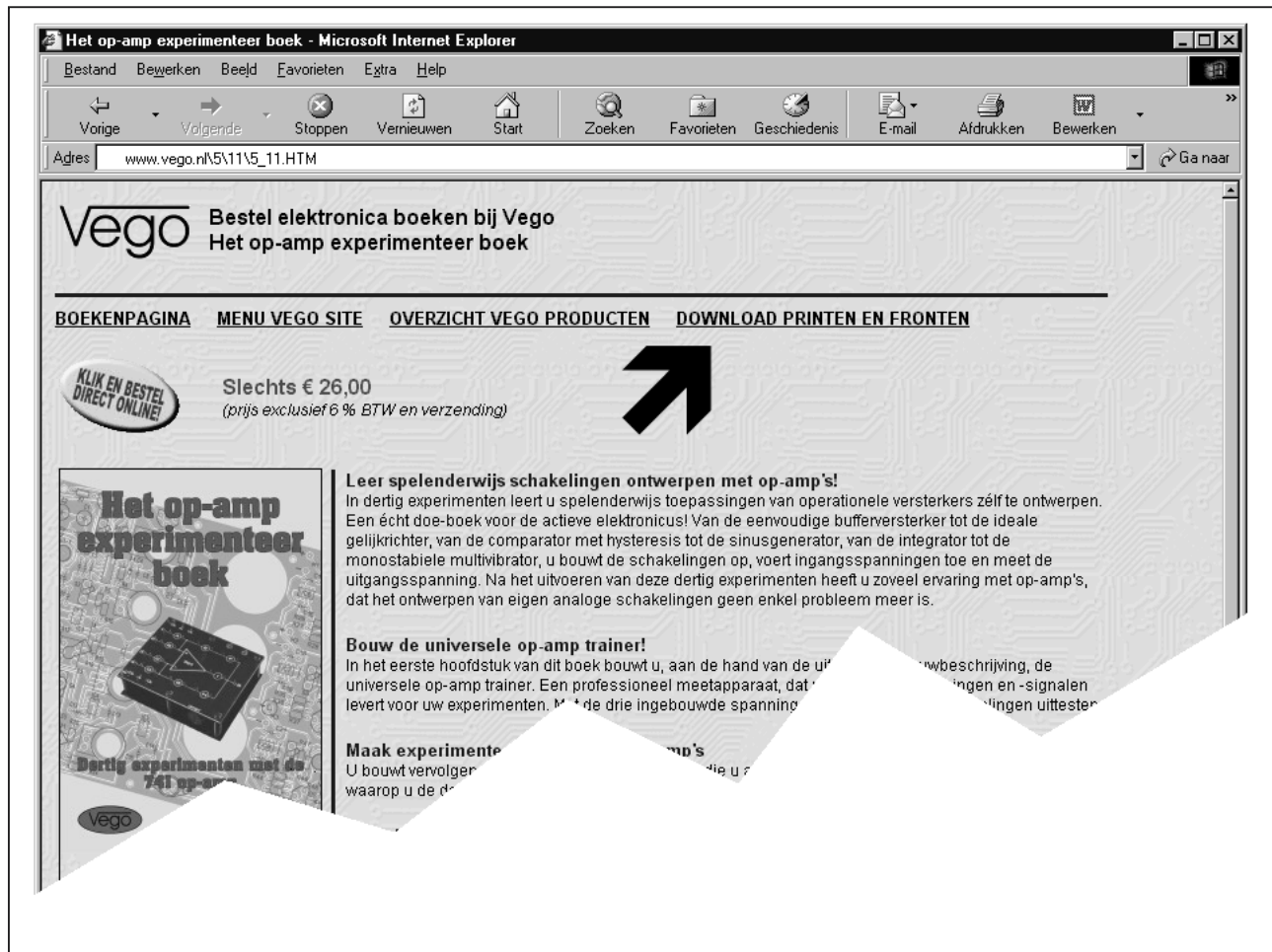
### Stap 3:

#### **De printen en frontplaten selecteren**

In de volgende pagina, voorgesteld in figuur 185 (zie pagina 157), ziet u een verkleinde weergave van de vijf ontwerpen, met ieder hun eigen download knop. Let op! Print deze



**Figuur 183:** Via de boekenpagina van de uitgever kunt u de ontwerpen van de printen en frontplaten downloaden.



**Figuur 184:** De pagina van dit boek met de download optie.

pagina af, want u ziet op deze pagina de afmetingen van de ontwerpen en deze gegevens heeft u in de volgende stappen hard nodig!

De vijf ontwerpen zijn beschikbaar als 4 bit per pixel zwart/wit hoge resolutie TIF-bestanden met LZW-compressie, een universeel grafisch formaat dat u in ieder beeldbewerkingsprogramma kunt downloaden. De vijf bestanden hebben als naam 01.TIF tot en met 05.TIF.

#### Stap 4:

##### Opslaan op uw harde schijf

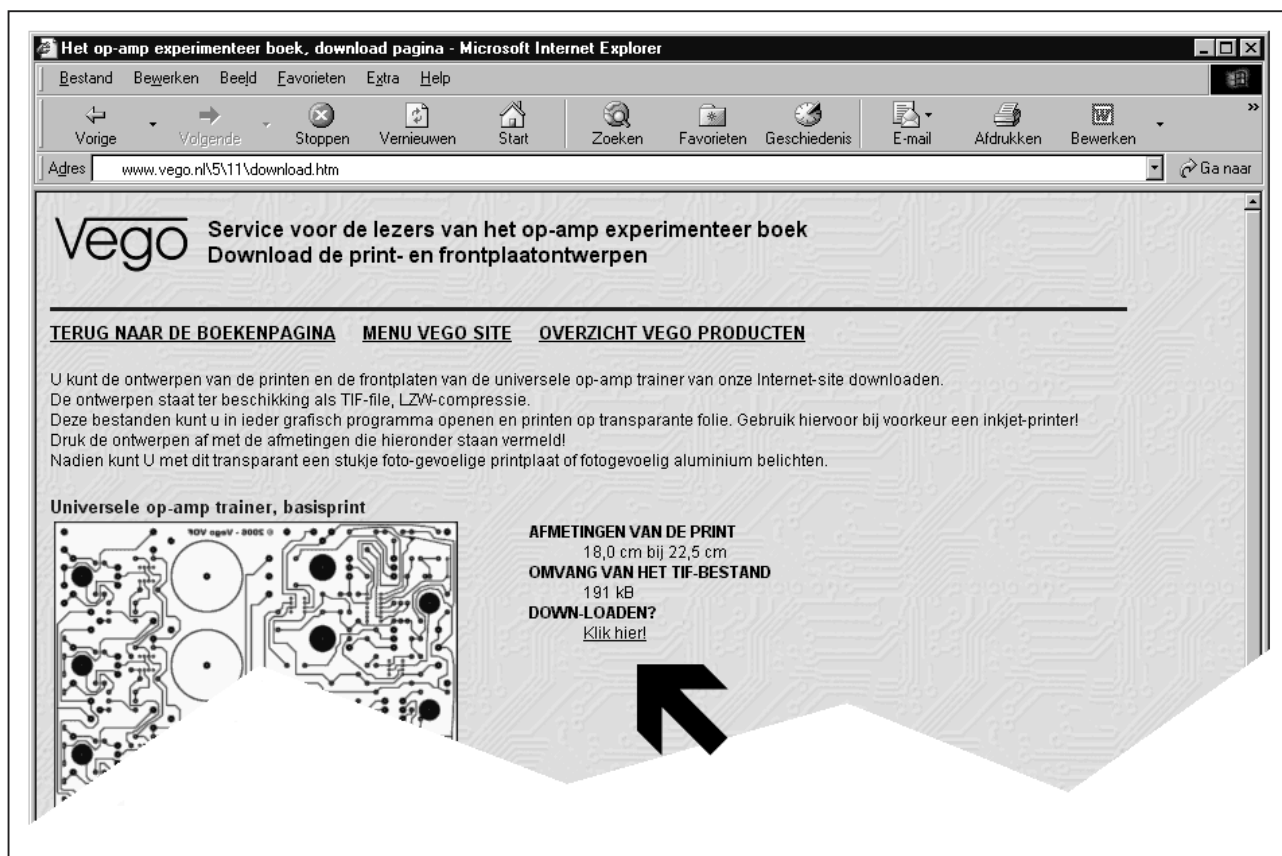
Klik vervolgens met de rechter muisknop op de link "[Klik hier!](#)" en selecteer in het pop-up menu van figuur 186 de optie "Doel opslaan als..."

Kies in het volgende venster van figuur 187 een bepaalde directory en sla de vijf bestanden hierin op.

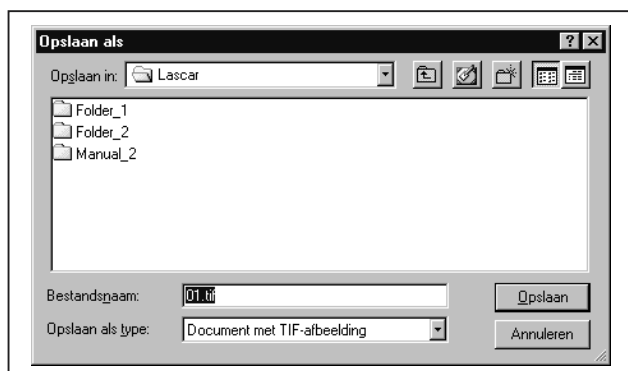


**Figuur 186:** Het downloaden van de TIF-bestanden via uw Internet Explorer.





**Figuur 185:** Op de volgende pagina staan de ontwerpen beschikbaar als TIF-bestand.



**Figuur 187:** Het opslaan van de TIF-bestanden op uw harde schijf.

#### Stap 5: Openen in uw favoriet beeldbewerkingsprogramma

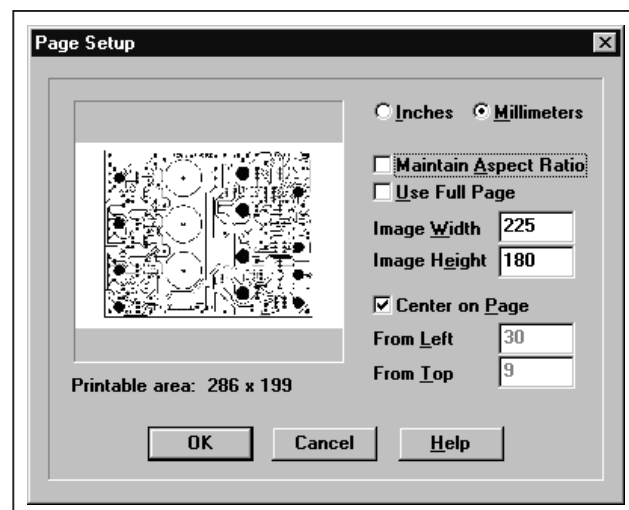
Open nu een TIF-bestand in uw een beeldbewerkingsprogramma zoals PaintShop Pro, zie figuur 188.

#### Stap 6: Printen op transparante folie

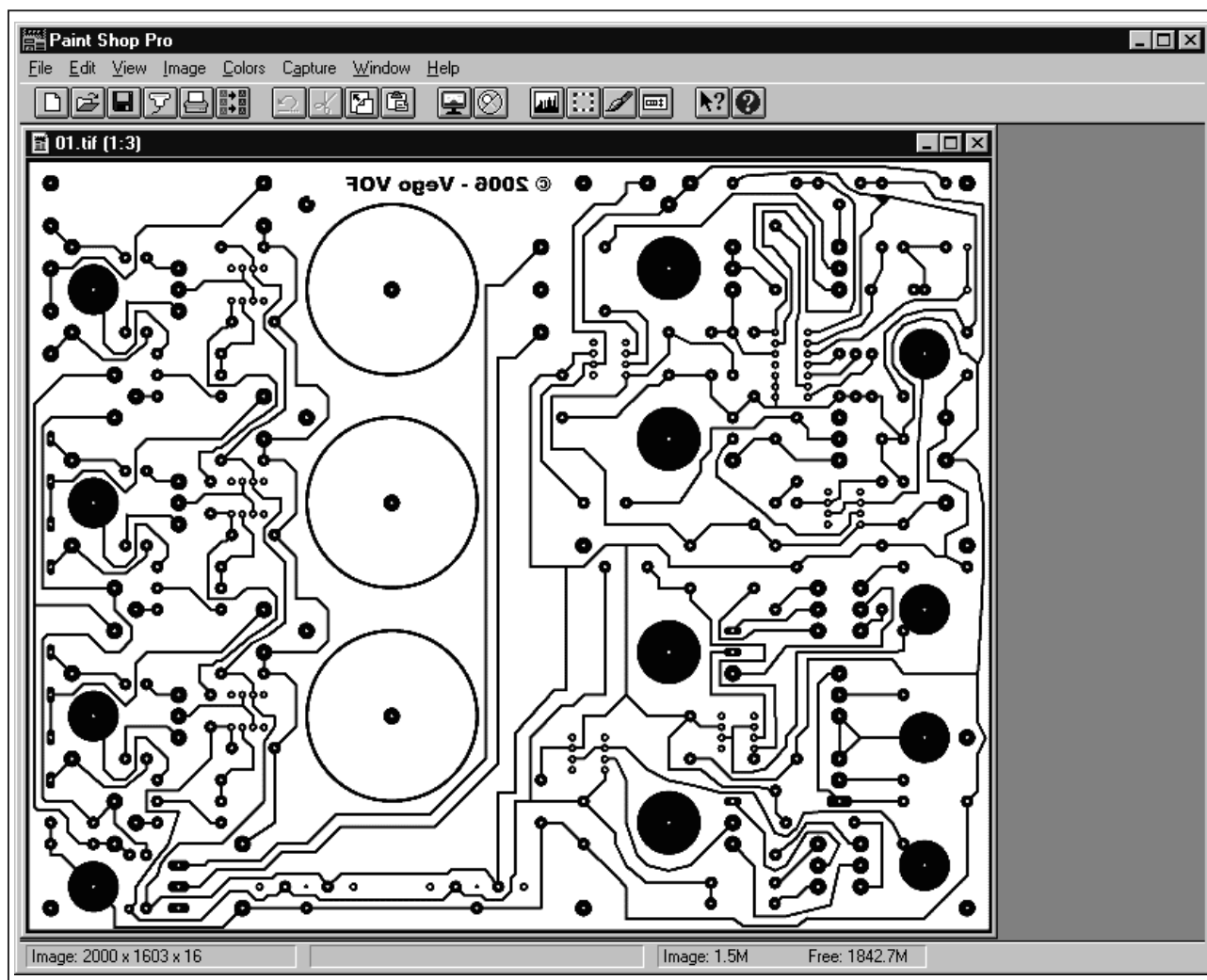
Ga nu via het menu "File" naar de optie "Print". In het Print-venster van figuur 189 stelt u de "Image Width" en "Image Height" in

op de afmetingen die vermeld staan op onze internetpagina van figuur 185.

U print uiteraard af op transparante folie en stelt de print-eigenschappen van uw inkjet-printer in op dit soort folie.



**Figuur 189:** Het afdrukken van de ontwerpen met de juiste afmetingen.



**Figuur 188:** U opent vervolgens de TIFs één voor één in een beeldbewerkingsprogramma.



Jos Verstraten

# Het op-amp experimenteer boek

158 pagina's

188 illustraties

ISBN-10 90-8529-000-7

ISBN-13 978-90-8529-000-1

NUR 468

SISO 663.43



De 741 is ongetwijfeld een van de meest universele en populaire operationele versterkers die ooit op de markt zijn gezet. Over dit kleine, achtpotige onderdeelje gaat dit boek. Aan de hand van eenvoudige experimenten gaan wij u leren hoe u met deze chip allerlei soorten schakelingen kunt ontwerpen. Schakelingen die de basis vormen van de analoge elektronica, dát deel van de elektronica waar u werkt met spanningen die alle mogelijke waarden kunnen hebben. Ondanks de digitale revolutie speelt deze analoge elektronica nog steeds een belangrijke rol. U kunt geen elektronisch apparaat bedenken of er zit wel analoge elektronica in. En de kans is groot dat de ontwerpers van die elektronica minstens een paar op-amp'jes in dit ontwerp hebben toegepast.

“Het op-amp experimenteer boek” is een écht doe-boek voor de actieve (beginnende) elektronicus! In dertig experimenten leert u de op-amp 741 toe te passen in even zoveel basisschakelingen, van de eenvoudige bufferversterker tot de ideale gelijkrichter, van de comparator met hysteresis tot de sinusgenerator, van de integrator tot de monostabiele multivibrator. Na het uitvoeren van deze dertig experimenten heeft u zoveel ervaring met op-amp's, dat het ontwerpen van eigen analoge schakelingen geen enkel probleem meer is.

In het eerste hoofdstuk van dit boek bouwt u, aan de hand van de uitgebreide bouwbeschrijving, de universele op-amp trainer. Een professioneel meetapparaat, dat u de ingangsspanningen en signalen levert voor uw experimenten. Met de drie ingebouwde spanningsmeters kunt u uw schakelingen uittesten.

ISBN-10 90-8529-000-7  
ISBN-13 978-90-8529-000-1

